Untersuchungen der Variabilität der Unterwasserschallausbreitung in der Nordsee

Frank Gerdes, Max Görler

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)

24340 Eckernförde, Email: FrankGerdes@bundeswehr.org

Einleitung

Im September 2014 wurden von der WTD 71 in der Deutschen Bucht (Abb. 1) Schallausbreitungsversuche mit einem vom Schiff abgehängten elektrischen Sendewandler und einer AirGun durchgeführt. Aufgezeichnet wurden die Schallsignale entweder mit einer bei der Forschungsplattform FINO3 installierten Hydrofonkette und/oder mit mehreren auf dem Meeresboden abgesetzten akustischen Messsystemen. Letztere wurden von der Firma DW-ShipConsult GmbH im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) betrieben. Die gemeinsam durchgeführten Versuche haben einen umfangreichen und interessanten Datensatz ergeben, mit dem sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität der Unterwasserschallausbreitung untersucht werden kann.

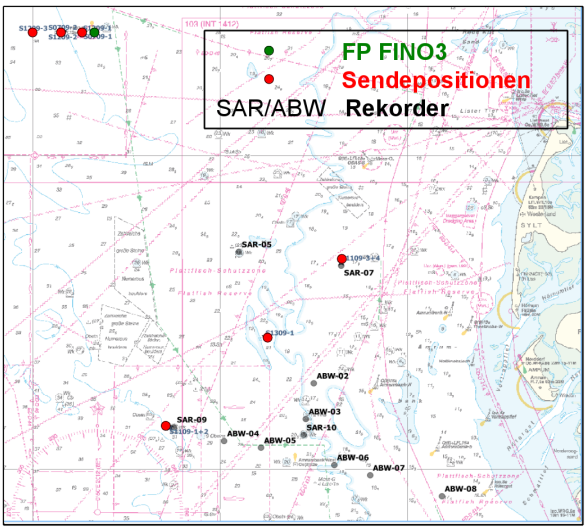


Abbildung 1: Übersicht der Positionen der im September 2014 durchgeführten Schallausbreitungsversuche. Oben links befindet sich die Forschungsplattform FINO3. Die dortigen roten Kreise markieren drei Positionen, an denen mit einem Sendewandler und/oder einer AirGun Unterwasserschall erzeugt wurde. Die grauen Markierungen (SAR/ABW) kennzeichnen die akustischen Aufzeichungssysteme des Bundesamts für Naturschutz. Auf einigen dieser Systeme wurde der Unterwasserschall aufgezeichnet, der mit Sendewandler und/oder AirGun an den dortigen rot markierten Positionen erzeugt wurde.

Die Untersuchung der Variabilität der Unterwasserschallausbreitung dient allgemein der Gewinnung einer Datenbasis, mit der Schallausbreitungsmodelle validiert und verbessert werden. Die speziell bei der Forschungsplattform FINO3 in der Nähe der Offshore-Windparks DanTysk und Sandbank [1] durchgeführten Messungen dienen der Bestimmung der Schwankungsbreite der Pegel von Unterwasserschall, der bei der Rammung der Fundamente von Offshore-Windenergieanlagen entsteht [3].

Dieser Beitrag gibt zunächst einen kurzen Überblick über den im September 2014 durchgeführten Schallausbreitungsversuch und konzentriert sich dann auf eine konkrete Messung, die bei der Forschungsplattform FINO3 stattfand.

Übersicht der Schallausbreitungsversuche

Der im September 2014 durchgeführte Seeversuch ist die Fortsetzung und deutliche Erweiterung des in 2013 durchgeführten Schallausbreitungsversuchs, über den auf der DAGA 2014 berichtet wurde [1].

Bei den im Bojenfeld des Bundesamts für Naturschutz durchgeführten Schallausbreitungsversuchen (Abb. 1) lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung der räumlichen Variabilität der Schallausbreitung. Hierzu wurde an drei Positionen entweder mit einem vom Schiff abgehängten elektrischen Sendewandler oder einer AirGun Unterwasserschall erzeugt (Abb. 2). Dieser wurde simultan auf mehreren Empfangssystemen (Abb. 3) aufgezeichnet. Dies erlaubt Rückschlüsse darüber, wie sehr die Schallausbreitung mit der räumlichen Ausbreitungsrichtung variiert.

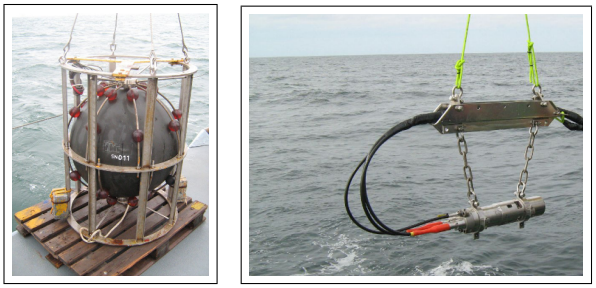
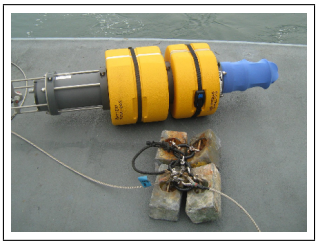


Abbildung 2: Links: Foto des elektrischen Sendewandlers. Rechts: Foto der Mini G.I.-AirGun (Leihgabe von Prof. Dr. Krastel, Institut für Geophysik der Universität Kiel.)

Bei den bei der Forschungsplattform FINO3 durchgeführten Schallausbreitungsversuchen dienten eine temporär ausgelegte AMAR-Boje mit einem Hydrofon (Abb. 3, linkes Bild) und eine permanent installierte Hydrofonkette (Abb. 4, rechtes Bild) als akustische Empfangssysteme. Mit der Hydrofonkette wird der Unterwasserschall gleichzeitig an mehreren Höhen über dem Meeresgrund aufgezeichnet. Insofern ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen ob und, wenn ja, wie stark der Schallpegel mit der Tiefe variiert. Technisch bedingt reicht die Hydrofonkette nicht bis an die Meeresoberfläche. Je nach



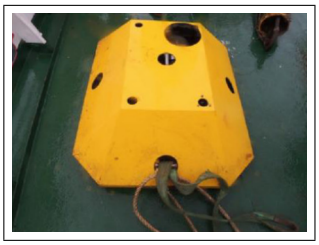


Abbildung 3: Links: Foto des kurzzeitig für die Schallausbreitungsversuche bei FINO3 ausgelegten AMAR-Messsystems der WTD 71. Rechts: Foto eines der von der Firma DW-ShipConsult für das BfN betriebenen AMAR-Messsysteme in einem fischereisicheren Trawl-Shield. AMAR ist die Abkürzung für Autonomous Multichannel Acoustic Recorder der Firma JASCO Applied Sciences, Kanada.

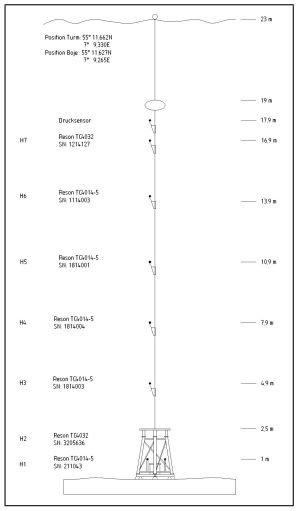


Abbildung 4: Links: Foto der Forschungsplattform FINO3 mit einigen Windenergieanlagen des Offshore-Windparks DanTysk im Hintergrund. Rechts: Skizze des auf dem Meeresgrund abgesetzten akustischen Messsystems mit Hydrofonkette. Der Abstand zu FINO3 beträgt ca. 200 Meter.

Wasserstand liegt das oberste Hydrofon 4 bis 5 Meter unter der Meeresoberfläche. Technische Details zu der Hydrofonkette werden in [1] beschrieben.

Mit dem Sendewandler wurden zwei verschiedene Signalfolgen gesendet, genannt A-Frame (Abbildung 5) und B-Frame. Die Folgen wurde im Wechsel gesendet, wobei z.B. der A-Frame immer auf der vollen Minute und der B-Frame auf der halben Minute begann. Der A-Frame besteht aus einer Folge von schmalbandigen (Bandbreite 100 Hz oder 200 Hz) Sweeps, auch LFMs (linearly frequency modulated) genannt, gefolgt von zwei breitbandigen Sweeps und zwei CW (continuous wave) Signalen. Der erste der schmalbandigen Sweeps beginnt bei 200 Hz und endet bei 300 Hz und der letzte beginnt bei 3200 Hz und endet bei 3400 Hz. Mit dieser Signalfolge kann die Schallausbreitung bezüglich ihrer Abhängigkeit von der Frequenz der Signale untersucht werden. Zeitliche Veränderungen der Schallausbreitung können erfasst werden, wenn sie langsamer als die Wiederholrate (60 Sekunden) eines einzelnen Sweeps stattfinden. Der B-Frame besteht aus der 117-fachen Wiederholung eines sogenannten PRBS (pseudo random binary sequence) Signals und hat eine Bandbreite von 1000 Hz mit einer Mittenfrequenz von 1300 Hz. Da die Signalfolge insgesamt 29.8 Sekunden lang ist, wird die Schallausbreitung alle 0.254 Sekunden abgetastet. Damit können auch schnelle zeitliche Veränderungen der Schallausbreitung erfasst werden. Im Folgenden werden nur Beispiele der mit dem A-Frame erzielten Ergebnisse beschrieben. Für Auswerteergebnisse, die auf dem B-Frame basieren, sei auf den Beitrag [2] verwiesen.

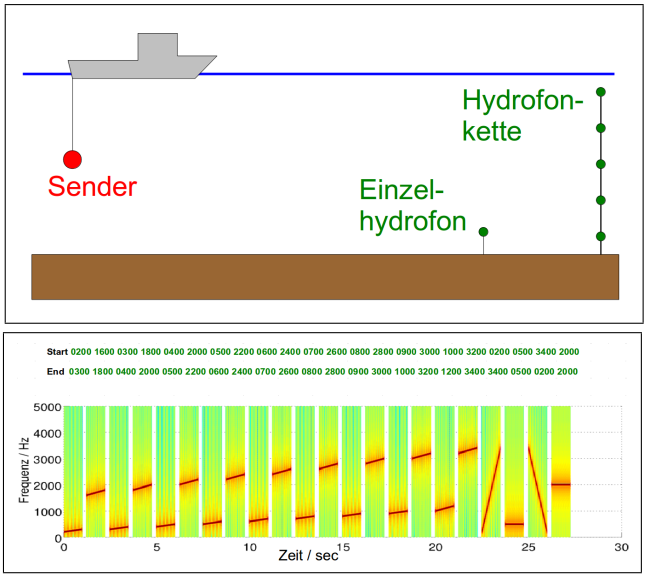


Abbildung 5: Oben: Skizze des bei FINO3 durchgeführten Schallausbreitungsversuchs. Von dem vor Anker liegenden Schiff wird der Sendewandler auf eine feste Tiefe abgehängt. Der Schall breitet sich im Wasser vom Sender bis zu dem Einzelhydrofon der AMAR-Sonde und der Hydrofonkette aus. Sender, AMAR-Sonde und Hydrofonkette lagen nicht notwendigerweise in einer Linie. Unten: Spektrogram der mit dem Sendewandler abgestrahlten Signalfolge. Die Folge wiederholte sich alle 60 Sekunden.

Ausbreitungsverlust bei FINO3

Zur Bestimmung des frequenzabhängigen Empfangspegels wird jeder der empfangenen Sweeps des A-Frames mit der Replik des enstprechenden Sendesweeps korreliert (Matched Filter Methode). Der Empfangspegel ist die Summe der Amplitude der Korrelationspeaks. Der Vorteil der Matched Filter Methode gegenüber einer energetischen Berechnung des Empfangspegels liegt darin, dass bei der Matched Filter Methode das Signal zu Rauschverhältnis um das Produkt aus Bandbreite (in Hertz) und Dauer (in Sekunden) des Teilsweeps besser ist. Voraussetzung ist allerdings, dass das Sendesignal exakt bekannt ist.

Bei der Addition der Amplituden der Korrelationspeaks müssen die richtigen Peaks ausgewählt werden. Peaks mit sehr geringer Amplitude werden in der Regel nur durch Hintergrundschall hervorgerufen und müssen ignoriert werden. Ohne an dieser Stelle auf Details eingehen zu wollen, weisen wir darauf hin, dass wir die Peaks mit zwei verschiedenen Verfahren auswählen. Solange die beiden Verfahren nahezu identische Ergebnisse liefern, ist gewährleistet, dass der berechnete Empfangspegel nicht

signifikant durch Hintergrundgeräusch verfälscht ist. Der Ausbreitungsverlust (TL) wird berechnet als die Differenz zwischen dem Sendepegel und dem berechneten Empfangspegel.

Abb. 6 zeigt den Ausbreitungsverlust für die Schallausbreitung zwischen Sendewandler und AMAR-Sonde. Die mittlere Distanz zwischen der GPS-Antenne des Schiffs und der Absetzposition der AMAR-Sonde betrug 1360 m und schwankte zwischen 1355 und 1365 m (Abb. 6). Die mittlere Tiefe des Sendewandlers betrug 10,2 m. Sie wurde kontinuierlich mit einem selbst-registrierenden Drucksensor, der am Wandlerrahmen befestigt war, gemessen. Der ca. einstündige Schallausbreitungsversuch wurde an einem Tag mit sehr ruhiger See ausgeführt. Bei FINO3 wurde eine signifikante Wellenhöhe von nur 0,3 m gemessen. Entsprechend schwankte die Tiefe des Wandlers nur zwischen 10 und 10,5 m (Abb. 6).

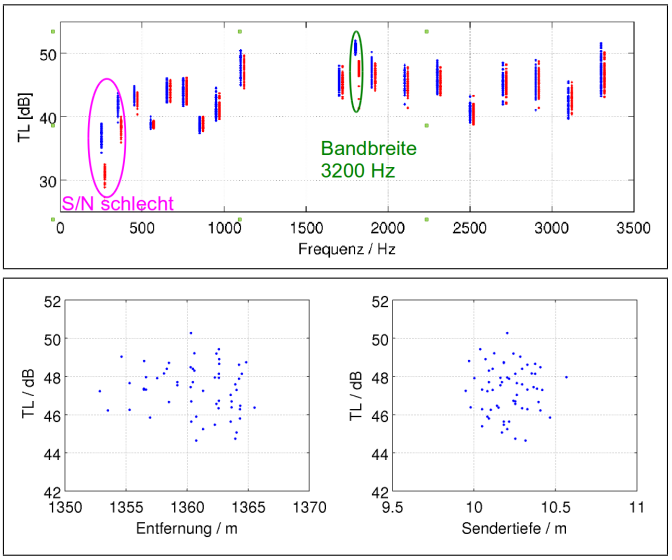


Abbildung 6: Oben: Mit der Matched Filter Methode berechnete Ausbreitungsverluste in Abhängigkeit der Mittenfrequenz der Sweeps. Für jede Frequenz sind ca. 60 TL-Werte dargestellt. Die roten und blauen Markierungen entsprechen der im Text erläuterten unterschiedlichen Auswahl der Korrelationspeaks bei der Berechnung des TL. Zur besseren Unterscheidung wurden die roten Markierungen um 30 Hz in der Frequenz veschoben. Man sieht, dass bei den niedrigen Frequenzen die Methoden unterschiedliche Ergebnisse liefern. Dies liegt an dem geringen Sendepegel des Sendewandlers bei niedrigen Frequenzen. Infolgedessen ist das Signal zu Rauschverhältnis schlecht. Bei den schmalbandigen Sweeps oberhalb 500 Hertz tritt das Problem nicht auf. Unten: Die linke und rechte Abbildung zeigen die TL-Werte in Abhängigkeit der Entfernung bzw. der Sendertiefe. Es werden hier nur die TL-Werte für 1900 Hz gezeigt.

Trotz der kaum veränderlichen Ausbreitungsgeometrie schwankte der Ausbreitungsverlust während des ca. einstündigen Versuchs deutlich. Die Schwankungsbreite kann an der vertikalen Ausdehnung der ca. 60 TL-Werte (für jede Frequenz) abgelesen werden. Deutlich zu erkennen ist, dass die Schwankungsbreite für unterschiedliche Frequenzen verschieden groß war. Es ist erwähnenswert, dass der Ausbreitungsverlust nicht mit der leicht veränderlichen Distanz oder der Sendertiefe korrelierte (siehe Abb. 6, untere Bilder).

Die Schwankung des Ausbreitungsverlustes kann qualitiativ leicht mit destruktiver und konstruktiver Interferenz verschiedene Schallwege erklärt werden (Abb. 7). Die verschiedenen Schallwege können unterschiedlich lang sein. Beträgt die Wegdifferenz genau eine Wellenlänge interferieren die Schallwellen konstruktiv, beträgt sie eine halbe Wellenlänge interferieren sie destruktiv und löschen sich bei gleicher Amplitude sogar vollständig aus. Bei den hier verwendeten Wellenlängen in der Größenordnung 1 m reichen schon geringe Änderungen der Ausbreitungsgeometrie (inklusive der bewegten Meeresoberfläche) aus, um die Interferenzen hervorzurufen.

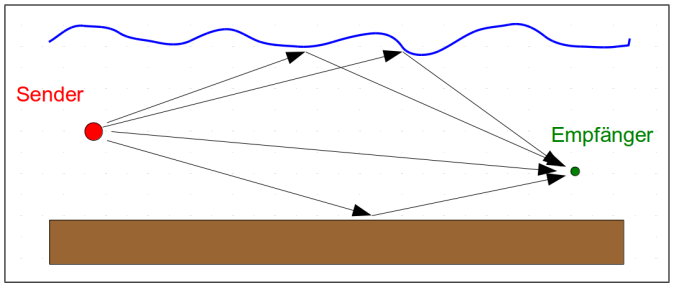


Abbildung 7: Stark vereinfachte Darstellung der Ausbreitung des Schalls zwischen Sender und Empfänger auf verschiedenen Wegen.

Mit der Hydrofonkette kann zusätzlich die Abhängigkeit des Empfangspegels und damit des Ausbreitungsverlustes von der Empfangstiefe untersucht werden, wie in Abb. 8 gezeigt. Man erkennt, dass der Ausbreitungsverlust mit der Tiefe des Hydrofons variiert. Allerdings hängt die Art der Variation von der Frequenz ab. Für Abb. 8 wurden sechs Frequenzen ausgewählt, für die sich recht unterschiedliche Tiefenabhängigkeiten zeigen.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde anhand von zwei Auswertebeispielen gezeigt (Abb. 6 und Abb. 8), dass der Empfangspegel trotz kaum veränderlicher Ausbreitungsgeometrie stark schwanken kann. Diese Erkenntnis ist nicht neu (siehe z.B. [2] und andere Autoren), genauso wenig wie die Erklärung der Ursache mittels der Mehrwegeausbreitung (Abb. 7).

Die Messungen sind dennoch von Bedeutung, da es trotz der relativ einfachen Ausbreitungsgeometrie schwierig ist, die Schwankungsbreite des TL mit Schallausbreitungsmodellen vorherzusagen. Hierbei besteht das Problem weniger darin, dass die Modelle nicht in der Lage wären, die Schallausbreitung korrekt zu berechnen, sondern vielmehr darin, dass es schwierig ist, die Eingabeparameter inklusive deren Schwankungsbreite für die Simulation bereit zu stellen. Mit Hilfe der hier vorgestellten Messungen soll untersucht werden, inwieweit die Simulation der Schwankungsbreite z.B. des Ausbreitungsverlustes dennoch möglich ist.

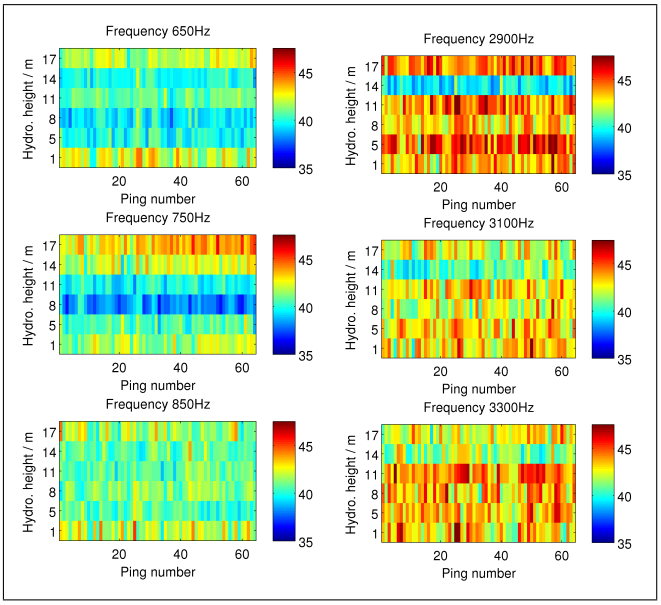


Abbildung 8: Ausbreitungsverluste für die Schallausbreitung zwischen Sendewandler und Hydrofonkette. Der Ausbreitungsverlust (TL) ist farblich kodiert und reicht in jedem Teilbild von 35 dB bis 50 dB. In jedem Teilbild ist auf der y-Achse die Höhe des Hydrofons über dem Meeresgrund aufgetragen. Es werden die Daten von 6 verschiedenen Hydrofonen gezeigt. Auf der x-Achse ist die sogenannte 'Ping number' aufgetragen. Jeder Ping entspricht dem Senden einer Sendefolge A, welche sich alle 60 Sekunden wiederholt. Die gesamte Messdauer beträgt also 65 Minuten. Die sechs Teilbilder zeigen den TL für die Mittenfrequenzen 650, 750, 850, 2900, 3100 und 3300 Hertz.

Es wurde erwähnt, dass nicht nur mit dem elektrischen Sendewandler sondern auch mit einer AirGun gesendet wurde. Wie in [3] dargestellt, erzeugt die AirGun Unterwasserschall, der dem einer Rammung sehr ähnlich ist. Damit sind die mit der AirGun durchgeführten Schallausbreitungsversuche besser (als die mit dem Sendewandler durchgeführten) geeignet, um Aussagen zur Schwankungsbreite von Rammschall zu machen. Andererseits hat man bei der AirGun keine so direkte Kontrolle über den Quellpegel und die Signalform wie bei dem Sendewandler. Insofern ist die Matched Filter Methode nicht anwendbar. Allerdings wurde bei fast allen Schallausbreitungsversuchen das gesendete Signale von einem vom Schiff angehängten Hydrofon aufgezeichnet. Es soll untersucht werden, ob dies in einem Abstand von ca. 10 m von der Schallquelle aufgezeichnete Signal, als Replik des Sendesignals verwendet werden kann, um die Matched Filter Auswertung auch für die AirGun Versuche zu ermöglichen.

Danksagung

Ein Teil der Messungen erfolgte im Auftrag und mit Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungszentrum Fachhochschule Kiel GmbH und wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Die Autoren bedanken sich bei dem Auftraggeber, der Besatzung des Forschungsschiffs Elisabeth Mann Borgese und dem Geschäftsbereich Messtechnik der WTD 71 für die hervorragende Unterstützung. Der Firma DW-ShipConsult GmbH und dem Bundesamt für Naturschutz danken wir für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Schallausbreitungsversuche.

Literatur

[1] Görler, M. und Gerdes, F: Messsystem zur Erfassung des Unterwasserschalls bei der Forschungsplattform FINO3. DAGA 2014, Oldenburg, März 2014.

[2] Gerdes, F., und Görler: Charakterisierung der Unterwasserschallausbreitung mit definierten akustischen Signalen bei der Forschungsplattform FINO3. DAGA 2014, Oldenburg, März 2014.

[3] Görler, M. und Gerdes, F.: Unterwasserschallmessungen bei der Forschungsplattform FINO3. DAGA 2015, Nürnberg, März 2015.