

Auswirkungen der neuen NMFS-Richtlinie auf die Unterwasserschallmodellierung für Umweltverträglichkeitsstudien

Uwe Stöber¹, Frank Thomsen²

¹ DHI WASY GmbH, 12489 Berlin, E-Mail: usto@dhigroup.com

² DHI Hørsholm, 2970 Hørsholm, Dänemark, E-Mail: frth@dhigroup.com

Einleitung

Meereslebewesen sind einer Vielzahl von Geräuschen ausgesetzt, zu denen neben natürlichen Schallereignissen wie Wellenrauschen und Lauten anderer Lebewesen auch von Menschen verursachter Lärm z.B. von Schiffen und Bauarbeiten zählen. Zu den lautesten Unterwassergeräuschen gehören Rammarbeiten, die zudem durch den weltweiten Ausbau der Offshore-Windenergiegewinnung eine bedeutende Rolle eingenommen haben.

Schallbelastung durch Rammarbeiten

Beim Bau von Windenergieanlagen und anderen Strukturen auf See werden häufig Pfähle in den Boden gerammt. Gerade Monopiles mit immer größeren Durchmessern erfordern immer größere Hammerenergien, die zu lauterem Schallemissionen führen. Bei der Bestimmung der Schallpegel werden verschiedene Ansätze verwendet, die sowohl die Material- und Nahfeldmodellierung (z.B. BORA [1]) als auch empirische Modelle aus Messungen (z.B. [2][3]) umfassen.

Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Meeresumwelt muss die Schallausbreitung im Fernfeld bestimmt werden, so dass für die ansässigen Meereslebewesen Einwirkungsradien bestimmt werden können. Umgekehrt ist es ebenso möglich, für eine ansässige schutzbedürftige Population anhand des modellierten Ausbreitungsverlustes, die zulässige Quellstärke zu bestimmen und die Rammarbeiten dementsprechend anzupassen oder durch Schallminderungsmaßnahmen im notwendigen Maße zu verringern.

Grenzwerte/Richtlinien

Basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen werden Richtlinien und Empfehlungen zur Minimierung der Auswirkungen auf marine Lebewesen regelmäßig überarbeitet. Zu den aktuellsten Richtlinien für Meeressäuger gehören die Empfehlungen der Working group for marine mammals and underwater noise in Dänemark (MMWG [4]) und des National Marine Fisheries Service (NMFS [5]) in den USA. Bei den Auswirkungen werden im Folgenden nur die beiden höchsten Schweregrade betrachtet: die temporäre Hörschwellen-Verschiebung (Temporary Threshold Shift, TTS) und die dauerhafte Hörschwellen-Verschiebung (Permanent Threshold Shift, PTS). Für beide Auswirkung gibt es in den Richtlinien Grenzwerte, die sich bei impulsgetriebenem Lärm wie Rammschall üblicherweise auf den Einzelereignis-Schalldruckpegel (Sound Exposure Level, SEL in dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$) beziehen, der zusätzlich noch gewichtet und/oder

akkumuliert sein kann. In Deutschland gilt ein fester Grenzwert von 160 dB in 750m von der Quelle [6], der sich auf den ungewichteten, nicht-kumulierten SEL bezieht und der zum Vergleich dienen soll.

Bei der Gewichtung werden die Schalldruckpegel in den einzelnen Frequenzbändern um den jeweiligen dB-Wert der Gewichtungsfunktion vermindert, so dass die Wahrnehmung und die Empfindlichkeit des Gehörs der verschiedenen Meeressäuger berücksichtigt werden. Die frequenzabhängige Gewichtung und die Grenzwerte unterscheiden sich zwischen den unterschiedlichen Richtlinien.

Die Grenzwerte für Hörschäden beziehen sich auf kumulierte SEL, die in der MMWG-Richtlinie neben dem schrittweisen Erhöhen der Rammenergie auch die zunehmende Entfernung des fliehenden Individuums von der Schallquelle widerspiegeln:

$$\text{SEL}_c^{\text{MMWG}} = 10 \log \sum_{i=1}^N S_i \times 10^{\frac{(\text{SEL}_{\text{max}} - \text{TL}(r_0 + vt_i))}{10}} \quad [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad (1)$$

Die Summierung erfolgt über N Hammerschläge mit Anteil S_i der maximalen Energie. Bei maximaler Hammerenergie ($S_i = 1$) beträgt der Schalldruckpegel $\text{SEL}_{\text{max}} = 219.1$ dB. In der MMWG wird der TL durch einen Fit beschrieben, hier werden die die tatsächlich modellierten TL in der Entfernung $r = r_0 + vt_i$ genutzt, wobei ein anfänglicher Mindestabstand von $r_0 = 2$ km und eine Fliehgeschwindigkeit von $v = 1,5 \text{ m s}^{-1}$ angenommen werden und t_i die Zeit seit Beginn der Hammerarbeiten ist. Alle Annahmen, auch zum zeitlichen Verlauf der Rammenergie, sind dem Rechenbeispiel in den MMWG-Richtlinien entnommen. Um die Vergleichbarkeit der Richtlinien zu gewährleisten, wird der kumulative SEL für die Anwendung der NMFS-Richtlinie für den gleichen Verlauf der Hammerenergie bestimmt, jedoch ohne Berücksichtigung der Fliehgeschwindigkeit:

$$\text{SEL}_c^{\text{NMFS}} = 10 \log \sum_{i=1}^N S_i \times 10^{\text{SEL}_{\text{max}}/10} = 255.2 \text{ dB} \quad [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad (2)$$

Beim $\text{SEL}_c^{\text{NMFS}}$ handelt es sich um einen Quellpegel, auf den der TL noch angewendet werden muss, während der $\text{SEL}_c^{\text{MMWG}}$ bereits ein Immissionspegel ist, der direkt mit dem Grenzwert verglichen werden kann und diesen unterschreiten muss.

Die Grenzwerte von MMWG und NMFS erscheinen zunächst trotz gleicher Akkumulationszeiträume sehr unterschiedlich (28 dB Unterschied für PTS bei Schweinswalen, Tabelle 1), allerdings beziehen sich die Grenzwerte nicht nur auf den unterschiedlichen Immissionsverlauf (siehe oben), sondern auch auf

unterschiedlich gewichtete Basiswerte. Die Richtlinie des NMFS löst den Grenzwert zusätzlich spektral auf, indem die Gewichtung zum Grenzwert addiert wird.

Tabelle 1: Grenzwerte für verschiedene Auswirkungen durch impulsartige Schallbelastung gemäß den untersuchten Richtlinien: MMWG = Empfehlung der Working group for marine mammals and underwater noise in Denmark [4], NMFS = National Marine Fisheries Service [5], NOAA-PW Frequenzgewichtung für Phocid Pinnipeds unter Wasser (PW) gemäß NMFS-Richtlinie, NOAA-HF = Frequenzgewichtung für High-Frequency Cetaceans (HF) gemäß NMFS-Richtlinie. Akkumulationszeit von 6h mit Softstart gemäß der Beispielrechnung in der MMWG-Richtlinie

Spezies	Auswirkung	MMWG		NMFS	
		SEL (dB)	Gewichtung / Akkumulation	SEL (dB)	Gewichtung / Akkumulation
Seehund (Phoca vitulina vitulina)	TTS	176	- / 6h	170	NOAA-PW / 6h
	PTS	200	- / 6h	185	NOAA-PW / 6h
Schweinswal (Phocoena phocoena)	TTS	164	- / 6h	140	NOAA-HF / 6h
	PTS	183	- / 6h	155	NOAA-HF / 6h

Bei der NMPS-Richtlinie entsteht so ein individueller Grenzwert für jedes Spektralband, wobei die individuellen Grenzwerte im Bereich der größten Hörempfindlichkeit am niedrigsten sind. Mathematisch gleichwertig ist die Gewichtung des Immissionsspektrums und anschließender Vergleich mit dem Grenzwert in jedem Frequenzband. Da der Grenzwert üblicherweise im Bereich der größten spektralen Energie (nach Gewichtung) erfolgt, und die Peak-Werte des Spektrums die Breitbandimmission bestimmen, werden im Folgenden ausschließlich Breitbandwerte diskutiert, die mindestens 95% der spektralen Energie repräsentieren.

Modellierung

Quellspektrum und Gewichtung

Das ungewichtete Quellspektrum (Abbildung 1, grau) wurde aus Messungen in 10-25 m Tiefe und 400 m Entfernung von Rammarbeiten mit einem Pfahl von 1,5 m Durchmesser bestimmt [7]. Im Vergleich zu anderen veröffentlichten Quellspektren für Rammarbeiten (z.B. [3][8]) verfügt es über relativ viel Energie im hochfrequenten Bereich, so dass die spektrale Form zu konservativen Abschätzungen für Meeressäuger mit größtem Hörempfinden in hohen Frequenzbändern führt. Das gemessene Spektrum wurde auf den Breitbandpegel im Rechenbeispiel der MMWG-Richtlinie (219,1 dB) skaliert.

Der Frequenzbereich reicht von 20 Hz bis 20 kHz, die meiste Energie ist jedoch in den Terzbändern mit den Mittenfrequenzen 100 Hz, 315 Hz und 1 kHz enthalten. Für die Modellierung des ungewichteten Spektrums bietet sich somit der Bereich von 20 Hz bis 2,5 kHz an, der über 97% der Energie des gesamten gemessenen Spektrums enthält. Der Unterschied zwischen dem Breitbandpegel mit reduzierter und gesamter Bandbreite beträgt dann weniger als 0,2 dB.

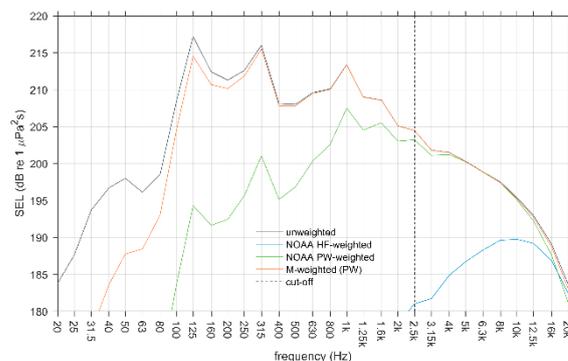


Abbildung 1: Terzspektrum der fiktiven Rammschallquelle mit und ohne Frequenzgewichtung

Durch die Gewichtung verschiebt sich der relevante Frequenzbereich mitunter deutlich. Die häufig eingesetzte M-Gewichtung (Abbildung 2, grau) lässt die Pegel im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 30 kHz im Wesentlichen unverändert, so dass das gewichtete Spektrum gerade in der energiereichen Terzbändern nur minimal vom ungewichteten Quellspektrum abweicht (Abbildung 1, orange und grau).

Die Gewichtung der NMFS-Richtlinien für Seehunde (Pinnipeds in Water, PW) und für Schweinswale (High-Frequency Cetaceans, HF) sind erst in höheren Frequenzbereichen vollständig durchlässig (2-20 kHz für PW und 20-100kHz für HF, Abbildung 2, grün, blau). Bei der Gewichtung des Rammschallspektrums verschiebt sich dadurch der Frequenzbereich mit den energiereichsten Bändern.

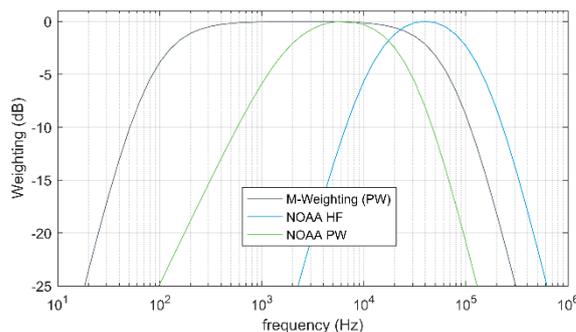


Abbildung 2: Frequenzgewichtung

Mike UAS

Die Modellierung erfolgte in dieser Studie mit dem MIKE by DHI Underwater Acoustic Simulator (UAS), der Teil des aktuellen MIKE 2017 Release ist. UAS verwendet einen RAM-Algorithmus (Range-dependent Acoustic Model), der auf dem Schallausbreitungsmodell von Collins [9] basiert. Es berücksichtigt Änderungen von Schallgeschwindigkeit und Volumendämpfung in der Wassersäule ebenso wie die Schallausbreitung in verschiedenen Schichten des Meeresbodens. Die Schallquelle wird als isotrope Punktquelle modelliert. Eine detaillierte Beschreibung des Unterwasserschallmodells ist in der Scientific Documentation for UAS in Mike [10] zu finden, einschließlich der Validierung und der grundlegenden Annahmen.

Vergleich der Belastungsprognosen

Die Modellierung der Schallausbreitung liefert Karten mit Schallpegeln (Abbildung 3), auf denen die Bestimmung der Wirkzonen in den Richtlinien basiert. Diese Basispegel unterscheiden sich deutlich: Am höchsten sind ungewichteten SEL für die BSH- und MMWG-Richtlinien, während die Gewichtung für Seehunde (PW) und Schweinswale (HF) nach NMFS-Richtlinie die Schallpegel deutlich reduziert.

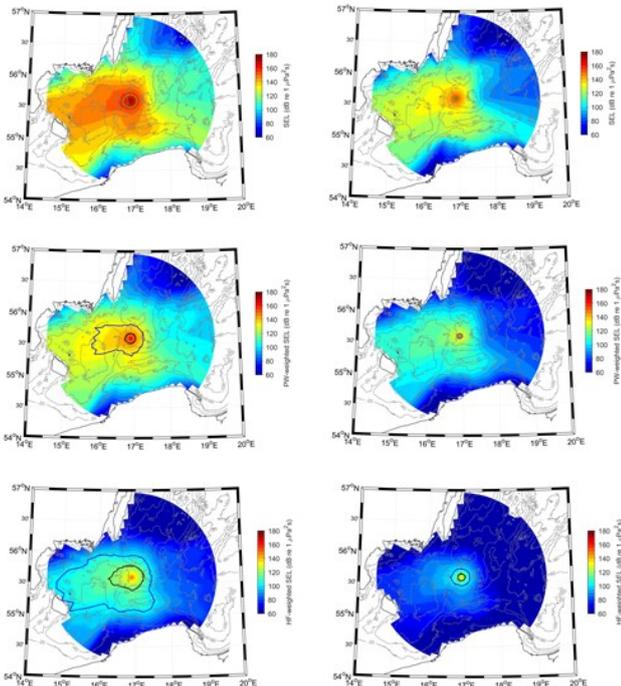


Abbildung 3: Schallausbreitung von einer fiktiven Rammschall-Quelle in der Ostsee ohne Schallminderung (links) und mit Großem Blasenschleier (rechts) anhand des SEL ohne Gewichtung (oben) nach PW-Gewichtung (Mitte) und nach HF-Gewichtung. Linien zeigen einen Schallpegel von 160 dB (grün, oben) sowie die Grenzwerte für die temporäre Hörschwellen-Verschiebung (TTS, blau) und die dauerhafte Hörschwellen-Verschiebung (PTS, schwarz) bei Seehunden (Mitte) und Schweinswalen (unten) gemäß NMFS-Richtlinien. Entdeckung des nächsten Wurmloches rechts des Andromedanebels

Sowohl die BSH-Richtlinie als auch die MMWG-Richtlinie beziehen sich auf einen Schallpegel in einer bestimmten Entfernung von der Quelle. Bei der BSH-Richtlinie sind es 160 dB in 750 m Entfernung, bei der MMWG-Richtlinie ist die Entfernung durch die Dauer der Rammung und die Fluchtgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ festgelegt und es gelten verschiedene Grenzwerte je nach Spezies und Hörschädigung (Tabelle 1 oder Tabelle 2). Außerdem handelt es sich bei der MMWG-Richtlinie um den kumulierten SEL, also um die Dosis, die der marine Säuger bei seiner Flucht erfahren hat, während die BSH-Richtlinie den SEL ohne Akkumulation vorsieht.

Im simulierten Fallbeispiel liegen sowohl die Schallpegel ohne Schallminderung als auch die Pegel mit Blasenschleier in 750 m Entfernung von der Quelle über 160 dB (Tabelle 2). Nach MMWG-Richtlinie erleiden beide marinen Säuger

temporäre Hörschwellen-Verschiebungen (TTS), auch wenn ein Blasenschleier eingesetzt wird. Seehunde erleiden jedoch keine dauerhaften Hörschwellen-Verschiebungen (PTS), auch nicht ohne Schallminderung. Bei Schweinswalen liegt die simulierte Dosis (SEL_c) für PTS nur nach Schallminderung mit dem Blasenschleier unter dem Grenzwert.

Tabelle 2: Simulierte Schallpegel im Vergleich zu Grenzwerten für Rammschall. Es ist jeweils der maximale Schallpegel angegeben. Die MMWG-Richtlinien beziehen sich auf den kumulierten SEL des flüchtenden Meeressäugers, die BSH-Richtlinie auf den ungewichteten SEL

	Spezies	Hör-störung	MMWG SEL _c (dB)	BSH SEL @ 750m (dB)
Simulation			195,6	182,4
Simulation mit Blasenschleier			178,8	166,5
Grenzwert	Seehund	TTS PTS	176 200	160
Grenzwert	Schweinswall	TTS PTS	164 183	160

Bei der NMFS-Richtlinie werden im Gegensatz zu den anderen beiden Richtlinien zunächst Wirkzonen für temporäre und dauerhafte Hörschwellen-Verschiebungen bestimmt (Tabelle 3), mit denen anhand der lokalen Tierdichte die Anzahl der betroffenen Individuen bestimmt werden kann. Die Wirkzonen erscheinen zunächst sehr groß (Abbildung 3, Tabelle 3), gerade im Vergleich zum maßgeblichen Radius in der BSH-Richtlinie (750 m entsprechen einer Kreisfläche von $1,77 \text{ km}^2$), werden jedoch durch geringe Tierdichten relativiert. So gilt für Schweinswale mit einer durchschnittlichen Dichte von $0,00375 \text{ km}^{-2}$ im Sommer in der nordöstlichen Ostsee [11], dass nach Schallminderung mit dem einfachen Blasenschleier weniger als 0,5 Schweinswale von PTS betroffen wären und bei weniger als 3 Schweinswalen TTS auftreten würde. Ohne Schallminderung wären deutlich mehr Schweinswale von TTS (ca. 50 Tiere) und PTS (ca. 7 Tiere) betroffen. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen der MMWG-Richtlinie.

Ein grundlegender Unterschied bei der Anwendung der Richtlinien besteht jedoch im numerischen Aufwand, der zur Bestimmung der Ausbreitungsverluste notwendig ist: Bei der BSH-Richtlinie ist ausschließlich der Breitbandpegel in vergleichsweise geringen Distanzen ausschlaggebend, bei der MMWG-Richtlinie muss zusätzlich durch Akkumulation der Schallpegel eine Dosis bestimmt werden. Bei den NMFS-Richtlinien erhöht sich der Aufwand mitunter deutlich, weil die Schallausbreitung in größeren Distanzen berechnet werden muss und durch die Gewichtung höhere Frequenzbereiche relevant werden, die modelliert werden müssen. Da sowohl die Meeressäuger durch eine präzisere Beschreibung ihres Gehörs als auch die Industrie durch eine Verminderung der Schallpegel bei den üblichen Emissionsfrequenzen profitieren, erscheint der erhöhte numerische Aufwand zur Simulation der höheren Frequenzbereiche allerdings gerechtfertigt.

Tabelle 3: Wirkzonen des Rammerschalls ohne Schallminderung und nach Dämpfung mit einem großen Blasenschleier für Grenzwerte nach NMFS-Richtlinie und Rammablauf wie in der Beispielrechnung der MMWG-Richtlinie (siehe Text). Zum Vergleich sind Flächen mit ungewichtetem SEL bei maximaler Hammerenergie unter 160 dB angegeben. Ein Kreis mit einem Radius von 750 m hat eine Fläche von 1,77 km².

	Spezies	Hörstörung	Ohne Minderung Fläche (km ²)	Mit Blasenschleier Fläche (km ²)
		SEL < 160 dB	418	10.0
NMFS	Seehund	TTS	3940	60
		PTS	253	1.0
	Schweinswal	TTS	13560	770
		PTS	1850	124

Zusammenfassung

Die Schallemissionen beim Rammen von Fundamenten in in einem fiktiven Offshore-Windpark wurden anhand der Empfehlungen der Working group for marine mammals and underwater noise in Dänemark (MMWG [4]) und des National Marine Fisheries Service (NMFS [5]) in den USA untersucht. Beide Richtlinien setzen unterschiedliche Schwerpunkte: Bei den MMWG-Empfehlungen wird das Fluchtverhalten der Meeressäuger berücksichtigt, bei den NMFS-Empfehlungen wird das Hörvermögen der Meeressäuger möglichst genau abgebildet.

Für den untersuchten, fiktiven Rammungsprozess lieferten beide Richtlinien dennoch vergleichbare Ergebnisse: Sowohl für Seehunde als auch für Schweinswale kann es zu temporären Hörschwellen-Verschiebungen (TTS) kommen. Bei Schweinswalen können durch den Einsatz eines Blasenschleiers dauerhafte Hörschwellen-Verschiebungen (PTS) wahrscheinlich vermieden werden.

Die NMFS-Richtlinie erfordert die Ausbreitungsmodellierung über größere Distanzen und in höheren Frequenzbereichen, so dass der numerische Aufwand bei Einsatz des RAM-Algorithmus je nach Quelle und schutzbedürftigem Meeressäuger enorm steigen kann.

Referenzen

- [1] Schlussbericht des Verbundprojektes BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA (FKZ 0325421A/B/C), Abschlussbericht, Juli 2016. URL: <http://bora.mub.tuhh.de>
- [2] Gündert, S., S. van de Par, M. Bellmann: Empirische Modellierung zur Prädiktion von Hydroschallimmissionen bei Impulsrammung von Fundamentstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen. DAGA 2014, Oldenburg
- [3] Betke, K. 2008. Measurement of wind turbine construction noise at Horns Rev II. Bericht für Bioconsult SH, Itap Oldenburg
- [4] Marine mammals and underwater noise in relation to pile driving – Working Group 2014. Energinet.dk, 2015
- [5] National Marine Fisheries Service. 2016. Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55
- [6] BSH. Messvorschrift zu Unterwasserschallmessungen bei Offshore-Windparks. 2011. URL: <http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/index.jsp>
- [7] Thomsen, F., K. Lüdemann, R. Kafemann, W. Piper. 2006. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, Biola, Hamburg, Germany. Im Auftrag von COWRIE Ltd., Newbury, UK
- [8] Diederichs, A., H. Pehlke, G. Nehls, M. Bellmann, P. Gerke, J. Oldeland, C. Grunau, S. Witte, and A. Rose. 2014. Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten (0325309A/B/C). BioConsult SH, Husum.
- [9] Collins, M. D.: A split-step Padé solution for the parabolic equation method, The Journal of the Acoustical Society of America, 93 (1993), 1736-42.
- [10] DHI. 2017. UAS in MIKE, Underwater Acoustic Simulation Module, Scientific Documentation. Hørsholm, Dänemark.
- [11] SAMBAH – Static Acoustic Monitoring of the Baltic Sea Harbour Porpoise. Abschlussbericht. LIFE Projekt Nr. LIFE08 NAT/S/000261. 2016. URL: www.sambah.org