

# Grundlagen der Schallminderung und Resonanzwirkung von Hydroschall Dämpfern im Wasser

Karl-Heinz Elmer

OffNoise-Solutions GmbH, D-31535 Neustadt, E-Mail: kh.elmer@offnoise-solutions.com

## Einleitung

Der Unterwasserlärm in den Meeren hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Insbesondere bei Rammarbeiten für Offshore-Gründungen werden die zulässigen Grenzwerte von Hydroschallpegeln im Allgemeinen weit überschritten. Es sind daher Maßnahmen zur Reduzierung der Hydroschallpegel für den geplanten Ausbau der Offshore-Windenergie erforderlich, um eine ernsthafte Gefahr für geschützte Meerestiere ausschließen zu können [1].

Zur Lösung dieses Problems ist ein neues Verfahren mit einfachen luftgefüllten Hüllkörpern (Ballons) entwickelt worden, das ganz allgemein zur Minderung von Unterwasserlärm eingesetzt werden kann. Im Gegensatz zu den bekannten Blasenschleiern mit freien Luftblasen sind bei dem Verfahren der Hydroschall Dämpfer (HSD) die einzelnen Ballons bezüglich ihrer Eigenfrequenz, Form, Größe, Anzahl, Abstände und Positionen vollständig kontrollierbar, was Voraussetzung für den effizienten Einsatz der Elemente ist. Analytische Ansätze und Untersuchungen zur Beschreibung der unterschiedlichen physikalischen Effekte zur Schallminderung sowie Ergebnisse von Offshore-Messungen werden dargestellt.

## Hydroschall Dämpfer (HSD)

Der Ansatz für ein effizientes Verfahren zur Minderung des Hydroschalls ist zunächst das außerordentlich hohe Streu- und Absorptionsvermögen von resonanzfähigen, regulären, möglichst sphärischen Luftblasen im Wasser, schon bei sehr geringen Konzentrationen von weit unter 0,1%, d.h. 1 Liter Luft pro m<sup>3</sup> Wasser. Beim Blasenschleier sind die einzelnen Blasen wenig kontrollierbar. Die Kontrolle ist aber eine Voraussetzung für den effizienten Einsatz von Blasen ist.

Zur Lösung dieses Problems werden nach [2] luftgefüllte Hüllkörper aus dünnem, hochelastischem Material als künstliche Luftblasen oder Ballons mit idealen Eigenschaften eingesetzt, die bezüglich ihrer Eigenschaften und Positionen vollständig kontrollierbar sind. Die Hüllkörper werden an Käfigen oder an Netzen, ähnlich den Fischernetzen oder an anderen durchströmbaren Unterkonstruktionen befestigt, welche die Unterwasserlärmquelle wie z.B. den Rammpfahl einer Offshore-Gründung umgeben. Alle für die schallmindernde Wirkung entscheidenden Eigenschaften der HSD-Elemente wie: Eigenfrequenz, Form, Größe, Position, Anzahl, Abstände und Dämpfung sind, im Gegensatz zum Blasenschleier, exakt einstellbar und alle Elemente sind positionierbar. Einzelne HSD-Elemente können darüber hinaus zur direkten Hydroschall Dämpfung der Stoßwellen mit einem hohen Dämpfungsvermögen ausgelegt werden.

Im Prinzip stellen Hydroschall Dämpfer eine gezielte technische Weiterentwicklung zur vollständigen Kontrolle und Optimierung der Schallminderung im Wasser gegenüber den unkontrollierbaren Luftblasen eines Blasenschleiers dar. Während es bei natürlichen Luftblasen im Wasser eine nicht beeinflussbare, weitgehend konstante, umgekehrt proportionale Beziehung zwischen dem Durchmesser und der Eigenfrequenz einer Luftblase gibt, kann die Eigenfrequenz von Ballons, auch unabhängig von der Größe, nur durch den Innendruck und die Steifigkeit und Dicke der einhüllenden Membran eingestellt werden sowie die Dämpfungswirkung durch HSD-Elemente mit hoher Materialdämpfung für jeden Frequenzbereich gesondert berücksichtigt werden [3].

In Bild 1 ist die starke Interaktion eines luftgefüllten elastischen Ballons als HSD-Element mit den Unterwasser Schallwellen nahe der Wasseroberfläche dargestellt. Es treten Resonanzeffekte mit hoher Streuung, Mehrfachreflexionen und Absorptionen von Schallwellen im Wasser auf.



Abbildung 1: Streuung, Absorption und starke Interaktion eines in Resonanz angeregten HSD-Elementes, nach [3].

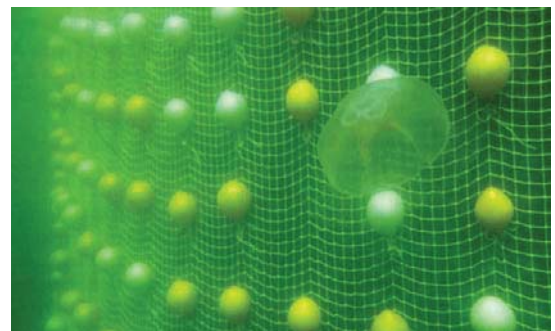


Abbildung 2: Netz mit HSD-Elementen das einen Rammpfahl zur Schallminderung im Meer umschließt, nach [3].

Die erforderliche Volumen-Konzentration der künstlichen Blasen liegt etwa bei 0,1% bis etwa 1%, lokal und in tieferen Schichten auch darüber. Bei diesen Volumenkonzentrationen sind die vertikalen Auftriebskräfte der Ballons nach Bild 2 sowie die horizontalen Kräfte aus den Gezeitenströmungen gering und problemlos aufzunehmen.

### Streuung und Absorption von Hydroschallwellen durch Resonanzeffekte

Neben der Schallreduktion durch Reflexionen an Impedanzübergängen zu Wasserkörpern mit HSD-Elementen, hängt die erzielte Wirkung der Reduktion von Unterwasserschall durch Hydroschall Dämpfer wesentlich von der Schallabsorption und -streuung infolge der Resonanzschwingungen der einzelnen HSD-Elemente ab.

Die Eigenfrequenz einer Gasblase mit dem Radius  $r$  ergibt sich nach MINNAERT aus der Elastizität der Blase, der Wassermasse mit der Dichte  $\rho_A = 1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , dem Wasserdruck in  $z$  m Tiefe von  $P_A = 10^5 (1+0.1z) \text{ N/m}^2$  und dem Verhältnis der spezifischen Wärmen  $\gamma = c_p/c_v = 1.4$  für Luft bei konstantem Druck  $c_p$  und Volumen  $c_v$  [1]. Für die Eigenfrequenz  $f_{HSD}$  eines HSD-Elementes wird der individuelle Innendruck  $P_H$  des gasgefüllten Hüllkörpers angesetzt sowie die zusätzliche Steifigkeit  $S$  der HSD-Membran:

$$f_{HSD} = \frac{1}{2\pi r} \left( \frac{3\gamma P_H + S}{\rho_A} \right)^{1/2} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

Der wirksame Streuquerschnitt  $\sigma_s$  von Luftblasen, ebenso wie von HSD-Elementen im Wasser kann nach [4] im Resonanzfall :

$$\sigma_s = 4\pi r^2 / \delta_R^2 \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

in Abhängigkeit von der Dämpfung  $\delta_R$  mehrere Hundert mal größer sein, als der geometrische Querschnitt  $4\pi r^2$ . Die Gesamtdämpfung  $\delta$  ergibt sich aus den Dämpfungskonstanten der sphärischen Abstrahlung  $\delta_r$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\delta_t$ , der Scherviskosität  $\delta_v$  sowie durch die relativ hohe, zusätzliche Materialdämpfung  $\delta_m$ :

$$\delta = \delta_r + \delta_t + \delta_v + \delta_m \quad (3)$$

Die Schallanregung in oder in der Nähe der Eigenfrequenz führt damit zu einer sehr effektiven Reduzierung der Schallamplituden sowohl durch Streuung als auch durch Absorption des Unterwasserschalls. Nach [4] kann die gesamte Verlustleistung  $\Pi_e$  aus der Streuung mit  $\sigma_s$  und der Absorption mit  $\sigma_a$  eines Elementes im sogenannten Extinktionsquerschnitt  $\sigma_e$  auf die Intensität  $I_p$  einer einfallenden ebenen Welle bezogen werden:

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a = \Pi_e / I_p \quad [\text{m}^2]. \quad (4)$$

Nach [4] ergibt sich für den Extinktionsquerschnitt  $\sigma_e$  des gedämpften HSD-Elementes damit:

$$\sigma_e = \frac{\Pi_e}{P_p^2 / \rho_A c} = \frac{4\pi a^2 (\delta / \delta_r)}{[(f_R / f)^2 - 1]^2 + \delta^2} \quad [\text{m}^2] \quad (5)$$

wobei  $P_p$  den Druck einer einfallenden Welle darstellt,  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $f_R/f$  das Frequenzverhältnis mit der Resonanzfrequenz  $f_R$ . Dann wird beim Durchlaufen der Strecke  $x$  der Schalldruckpegel der einfallenden Schallwelle durch ein HSD-Element um den Schallpegel  $\Delta SPL$  gesenkt:

$$\Delta SPL = -10 \sigma_e x \log_{10} e \quad [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \quad (6)$$

oder 
$$\Delta SPL = -10 \sigma_e N x \log_{10} e \quad [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \quad (7)$$

Bei mehreren Elementen ist  $N \sigma_e$  der gesamte Extinktionsquerschnitt pro Einheitsvolumen. In Abbildung 3 ist die theoretische Reduktion des Hydroschallpegels  $A \sigma_e$  mit  $A=10 \log_{10} e$  bei Resonanzanregung für unterschiedliche Größen einzelner Elemente im Wasser dargestellt als:

$$\alpha = -\Delta SPL / x N = A \sigma_e \quad [\text{dB/m/Blase/m}^3] \quad (8)$$

mit 
$$A = 10 \log_{10} e. \quad (9)$$

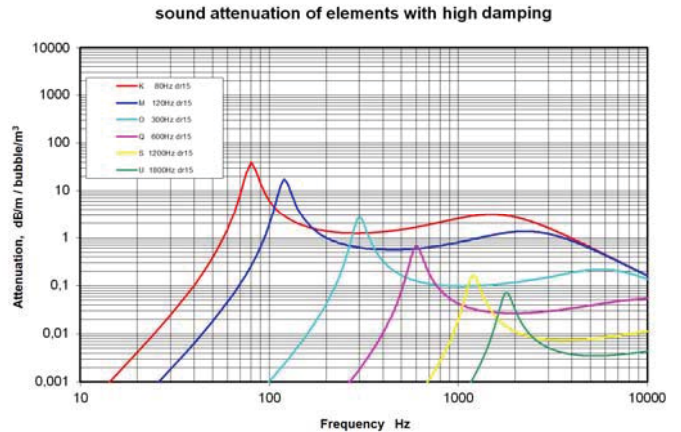


Abbildung 3: Schallreduktionen von einzelnen stark gedämpften HSD-Elementen pro Einheitsvolumen.

Bei Offshore Rammarbeiten wurden mit einem HSD-Netz um einen Rammpfahl mit 25 HSD-Ballons pro  $\text{m}^2$  entsprechend Bild 2 Schallminderungen bis 23dB im SEL-Spektrum nach Bild 4 gemessen. Die Eigenfrequenz der Ballons ist auf ca. 120 Hz abgestimmt worden.

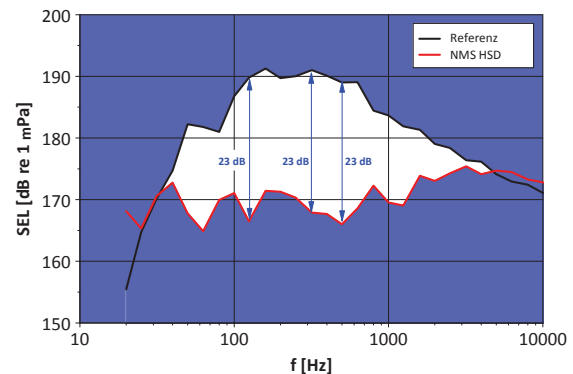


Abbildung 4: Schallminderung bis 23dB durch ein HSD-Netz entsprechend Bild 2 am Offshore-Rammpfahl, [3].

### Literatur

- [1] Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T.; *Standardverfahren z. Ermittlung u Bewertung d Belast. der Meeresumwelt d. Schallim. von OWEA*, BMU-Ber. **0329947**, 2007.
- [2] Elmer, K.-H.: *Pile driv. noise reduct. using new HSD*, BSH-Worksh. Pile Driving, ECS2010, Stralsund, 2010.
- [3] Elmer, K.-H.: *UW pile driv. noise red.. by air filled balloons a. PE-foam elem. as HSD*, DAGA 2013, Meran.
- [4] Medwin, H.H, Clay, C.S: *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, San Diego, CA, 1988.