

Auslegung eines akustischen Fensters für eine eisfeste Fächerlotanlage

Christoph Abegg

Wärtsilä ELAC Nautik GmbH, 24118 Kiel, Deutschland, Email: Christoph.Abegg@ELAC-Wartsila.de

Einleitung

Eine Fächerlotanlage ist ein bathymetrisches Sonar zur Tiefenvermessung des Meeresbodens. Durch das Senden eines Schallfächers quer zum Schiff ist es möglich Tiefenwerte über einen weiten Bereich simultan zu bestimmen (Abb. 1). Ein kritischer Parameter für eine Fächerlotanlage ist unter anderem der Öffnungswinkel des Sendefächers quer zum Schiff, da dieser die Breite des erfassten Meeresbodens die sog. Überdeckung (swath width) direkt bestimmt. Mit einer größeren Überdeckung kann simultan ein größerer Bereich vermessen werden.

Eine Fächerlotanlage besteht aus einem in Schiffsängsrichtung angeordneten Projektorarray und – orthogonal dazu – einem Hydrophonarray (*Mills-Cross*-Anordnung). Beide Arrays werden eben in den Schiffsboden eingebaut und haben direkten Kontakt zum Seewasser. Für die Installation auf einem Eisbrecher ist je nach Eisklasse ein Schutz der Wandlerarrays vor Eisdruck notwendig. Hier kommen akustische Fenster aus Polyurethan (PUR) zum Einsatz, welche mechanisch für den spezifizierten Eisdruck ausgelegt sein müssen. Dieser Beitrag befasst sich mit der akustischen Auslegung eines solchen Fenster mit dem Ziel eine möglichst geringe Einschränkung der akustischen Überdeckung zu erreichen.

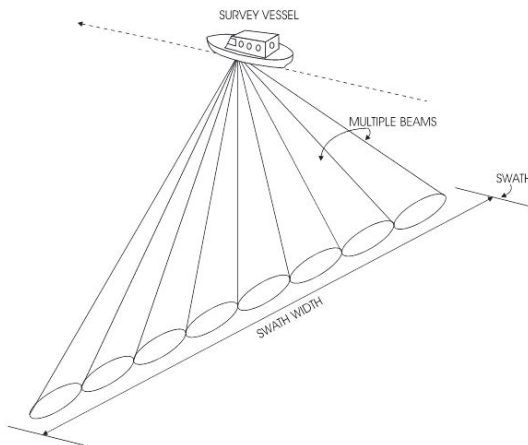


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Multi-beam Sendefächers (swath) und der daraus resultierenden Überdeckung des Meeresbodens (swath width).

Beschreibung des Problems

Das untersuchte Problem reduziert sich auf die Durchschallung einer homogenen, unendlich großen Platte der Dicke d , die beidseitig an Fluide angrenzt (siehe Abb. 2). Während die Platte eine elastische Schicht darstellt,

die durch Elastizitätsmodul E , Dichte ρ und Querkontraktionszahl ν charakterisiert wird, sind die bestimmenden Parameter der reibungsfreien Fluide die Dichten ρ_1, ρ_2 sowie die Schallgeschwindigkeiten c_1, c_2 . Eine ebene Schallwelle fällt mit dem Einfallswinkel Θ_1 auf die Platte und teilt sich in eine reflektierte und eine transmittierte Welle.

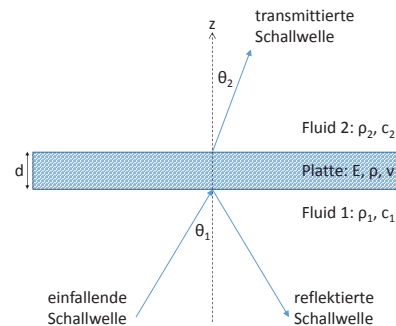


Abbildung 2: Eine einfallende Schallwelle trifft aus dem unteren Halbraum (Fluid 1) kommend auf eine elastische Platte und teilt sich in eine reflektierte sowie eine in den oberen Halbraum (Fluid 2) transmittierte Schallwelle.

Der Transmissionsgrad ist definiert als das Verhältnis der Intensitäten der transmittierten zur einfallenden Schallwelle:

$$TG = \frac{I_{\text{transmittiert}}}{I_{\text{einfallend}}} \quad (1)$$

Die logarithmische Größe des Transmissionsverlustes (Transmission Loss) ist dann:

$$TL = 10 \log TG^{-1} \quad (2)$$

Im Weiteren werden folgende Bezeichnungen für die winkelabhängigen, modifizierten Kennimpedanzen der Fluide sowie deren Verhältnis verwendet:

$$\begin{aligned} Z\theta_1 &= \frac{Z_1}{\cos \Theta_1} = \frac{\rho_1 c_1}{\cos \Theta_1} \\ Z\theta_2 &= \frac{Z_2}{\cos \Theta_2} = \frac{\rho_2 c_2}{\cos \Theta_2} \\ r\theta_{12} &= \frac{Z\theta_1}{Z\theta_2} \end{aligned}$$

Theorie der Plattendurchschallung

Die Theorie der Plattendurchschallung wird in der Literatur ausführlich behandelt [2] und kommt in verschiedenen Bereichen der Technik zur Anwendung. Oft werden jedoch nur Näherungslösungen verwendet, die im vorliegenden Anwendungsfall nicht ausreichend sind. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze vorgestellt und miteinander verglichen.

Das Massegesetz:

Die weitreichendste Näherung stellt das Berger'sche Massegesetz (3) dar (siehe z.B. [1]), bei dem die elastischen Eigenschaften der Platte komplett vernachlässigt werden und die einzig bestimmende Größe der Platte die Masse pro Flächeneinheit $m' = \rho d$ ist:

$$TG^{-1} = 1 + \left(\frac{\omega m'}{2Z\theta_1} \right)^2 \quad (3)$$

Das Massegesetz besagt, dass der Transmissionsverlust mit Erhöhung der Frequenz um eine Oktave oder einer Verdoppelung der Masse sich um 6 dB vergrößert. Die Abhängigkeit vom Einfallswinkel ist über $Z\theta_1$ gegeben, d.h. mit größer werdendem Winkel scheint die Impedanz des Fluids zu zunehmen und der Transmissionsverlust nimmt ab. Ein Beispiel zeigen die Massegesetz-Kurven in Abb. 3 für eine 10 mm Stahlplatte zum einen als Funktion der Frequenz und zum anderen als Funktion des Einfallswinkels bei 70 kHz.

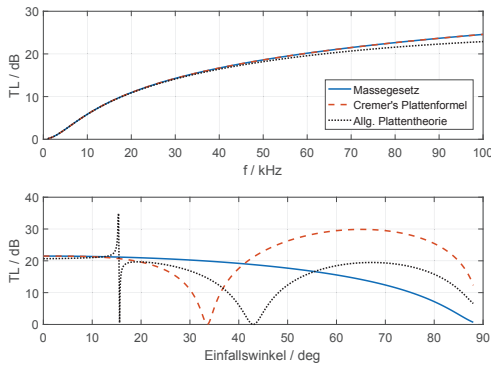


Abbildung 3: Transmissionsverlust (TL) einer 10 mm Stahlplatte mit beidseitig Wasser für das Massegesetz, die Plattenformel nach Cremer und die allgemeine Formulierung nach Wittek. Der obere Graph stellt den TL bei senkrechtem Einfall als Funktion der Frequenz dar und der untere den TL bei 70 kHz als Funktion des Einfallswinkels.

Die Plattenformel nach Cremer:

Eine Näherung der Plattendurchschallung für dünne Platten, die die elastischen Eigenschaften der Platte berücksichtigt ist die Plattenformel von Cremer [3]. Eine Platte ist dünn, wenn ihre Dicke d klein gegen die Wellenlänge der Dehnwelle in der Platte ist. In Abb. 4 ist die Bedingung für eine dünne Platte graphisch dargestellt.

In der Plattenformel von Cremer wird die Biegewelle über die Biegesteifigkeit B berücksichtigt:

$$TG^{-1} = \frac{1}{4r\theta_{12}} \left\{ (1 + r\theta_{12})^2 + \left(\frac{\omega m'}{Z\theta_2} \right)^2 \left[1 - \omega^2 \frac{B}{m'} \left(\frac{\sin \Theta_2}{c_2} \right)^4 \right]^2 \right\} \quad (4)$$

Es gibt in der Formel einen zusätzlichen Term in der eckigen Klammer, der den Effekt der Koinzidenz (Spuranpassung) beschreibt. Bei einer bestimmten Frequenz

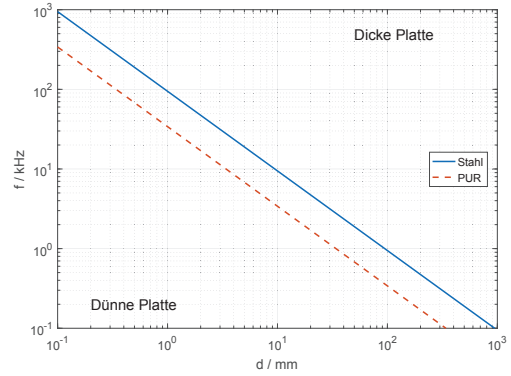


Abbildung 4: Bedingung für eine "dünne" Platte im Sinne der Plattenformel nach Cremer. Für eine Platte aus Stahl und PUR ist die Grenze zwischen dünner und dicker Platte dargestellt. Wenn für eine gegebene Plattendicke d die Frequenz oberhalb der Kurve liegt, so gilt die Platte als dick und für Frequenzen unterhalb der Kurve als dünn.

fällt die Wellenlänge der Biegewelle in der Platte mit der Projektion der Wellenlänge überein, die eine unter einem bestimmten Winkel einfallenden Schallwelle hat. Dann tritt Koinzidenz auf und der Transmissionsverlust zeigt ein Minimum. In Abb. 3 ist dieser Effekt für eine 10 mm Stahlplatte bei 70 kHz bei einem Einfallswinkel von 34° zu erkennen.

Formulierung der Plattendurchschallung nach Wittek:

In [4] wird eine allgemeine Formulierung der Plattendurchschallung vorgestellt, die nicht auf dünne Platten beschränkt ist. Mit Definition der Normalkomponenten der Verschiebung ξ_1, ξ_2 sowie der Normalkomponenten der mechanischen Spannung σ_1, σ_2 (Abb. 5) kann für eine elastische Platte eine Plattenmatrix \mathbf{D} definiert werden (siehe [4, Seite 45]) für die gilt:

$$\begin{bmatrix} \xi_2 \\ \sigma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \sigma_1 \end{bmatrix}$$

Für dämpfungsfreie Medien und reibungsfreie Fluide gilt dann:

$$TG^{-1} = 1 + \frac{1}{r\theta_{12}} (U^2 + V^2) \quad (5)$$

mit

$$U = \frac{1}{2} \left(\omega Z\theta_1 D_{12} + \frac{1}{\omega Z\theta_2} D_{21} \right)$$

$$V = \frac{1}{2} (D_{11} - r\theta_{12} D_{22})$$

Diese allgemeine Plattentheorie nach Wittek zeigt für die 10 mm Stahlplatte bei 70 kHz eine Singularität bei 14° und ein Minimum bei 43° Einfallswinkel (Abb. 3). Die Singularität bei 14° ist der Winkel der Totalreflexion des Übergangs Wasser-Stahl und des Minimum bei 43° der Winkel der Spuranpassung.

Finite Elemente Modell:

Als Referenz wurde eine FE-Modell erstellt, mit dem das

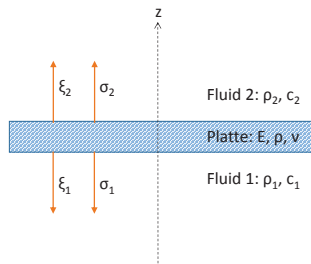


Abbildung 5: In der Formulierung des allgemeinen Modells werden die Normalkomponenten der Verschiebung ξ_1 und ξ_2 sowie die Normalkomponenten der mechanischen Spannung σ_1 und σ_2 über die Plattenmatrix \mathbf{D} verknüpft.

Problem der Plattendurchschallung numerisch berechnet werden kann (siehe Abb. 6). Eine Platte der Dicke d (z -Koordinate) ist beidseitig über eine Fluid-Struktur-Koppelung (FSI) an Fluidschichten mit der Dicke eine Wellenlänge gekoppelt. Die Fluidschichten wiederum sind mit einer absorbierenden Schicht (Perfectly Matched Layer, PML) abgeschlossen. In Querrichtung (x -Koordinate) verwendet das Modell eine zyklische Randbedingung. In Richtung der y -Koordinate hat das Modell eine Ausdehnung von 2 Elementen, wobei die Elementgröße $\frac{\lambda}{32}$ beträgt. Eine ebene Schallwelle fällt aus variablen Richtungen in der x - z -Ebene auf das Modell ein.

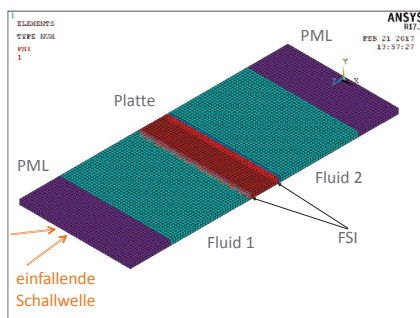


Abbildung 6: Finite Elemente Modell zur numerischen Berechnung der Plattendurchschallung. Die Platte ist über Fluid-Struktur-Koppelung (FSI) an zwei Fluidschichten gekoppelt, die wiederum durch eine absorbierende Schicht (Perfectly Matched Layer, PML) abgeschlossen werden.

In Abb. 7 sind die Kurven aller vier Modelle vergleichend dargestellt. Die Ergebnisse der FEM Simulation sind bis zu Einfallswinkeln von 80° identisch zu der oben beschriebenen allgemeinen Plattentheorie. Die Winkel der Spuranpassung und der Totalreflektion des Übergangs Wasser-Stahl werden exakt reproduziert.

Messung

Für eine Eisbrecherinstallation einer 20 kHz Fächerlotanlage wurde ein eisfestes akustisches Fenster aus einem PUR realisiert. Das Fenster hat eine Dicke von 70 mm und ist damit mechanisch ausgelegt für spezifizierte Eislasten von bis zu 30 bar auf der gesamten

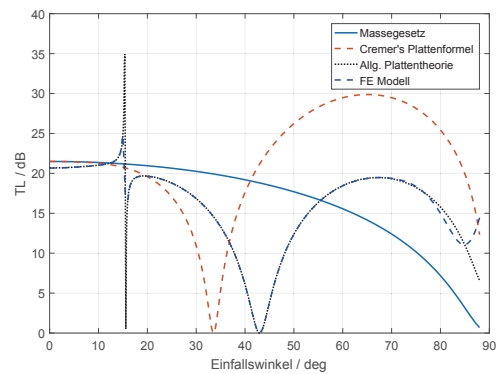


Abbildung 7: Transmissionsverlust (TL) einer 10 mm Stahlplatte mit beidseitig Wasser für alle vorgestellten Formulierungen bei 70 kHz als Funktion des Einfallswinkels.

Fensterfläche. In Abb. 8 ist ein Schnitt durch den Schiffseinbau dargestellt. Der Sendewandler ist im Schiff in einem mit Wasser gefluteten Kofferdam installiert, der mit dem akustischen Fenster im Schiffsboden eben abschließt.

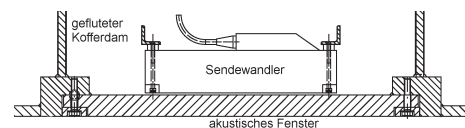


Abbildung 8: Schnitt durch den Einbau des akustischen Fensters mit Sendewandler im Schiff. Der Sendewandler ist in einem gefluteten Kofferdam eingebaut, der mit einem akustischen Fenster aus PUR gegen Eisdruck geschützt ist.

Für dieses Fenster wurde eine Messung im ELAC Mess-tank durchgeführt und mit der oben beschriebenen allgemeinen Theorie sowie der FEM Simulation verglichen. Der verwendete Messtank hat eine Wassertiefe von 6 m und eine Größe von 9 m x 12 m. Das akustische Fenster mit einer Größe von 1 m x 1 m wurde im nominellen Abstand vor den Sendewandler montiert und in halber Wassertiefe an einem Drehgestells fixiert. In 30 cm Abstand vor dem Fenster befand sich ein feststehendes, kalibriertes Empfangshydrophon. Durch Drehen des Fensters mit Sendewandler konnte ein schrägen Schalldurchgang durch das Fenster vermessen werden. Der Messaufbau ist in Abb. 9 und das akustische Fenster mit Sendewandler vor Einbau in den Tank in Abb. 10 abgebildet.

Alle Messungen wurden mit gepulsten Sendesignalen durchgeführt, um mittels Fensterung die Reflektionen von der Wasseroberfläche und den Tankwänden auszublenzen. Für die Messung des Transmissionsverlustes im Fenster, wurde immer eine Referenzmessung ohne Fenster durchgeführt und dann die Pegeldifferenz zur Messung mit Fenster bestimmt. Somit ist die Messung unabhängig von der Abstrahlcharakteristik des Sendewandlers.

Einen Vergleich der Messung im Tank mit der Simulation der allgemeinen Theorie sowie dem FE-Modell für eine

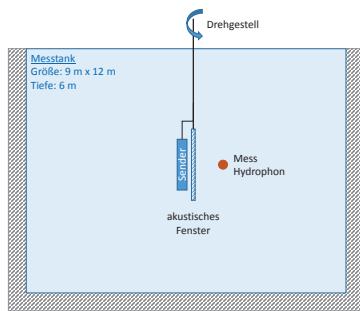


Abbildung 9: Schematische Darstellung des ELAC Mess-tanks, der Messposition des akustischen Fensters sowie des kalibrierten Messhydrophons.

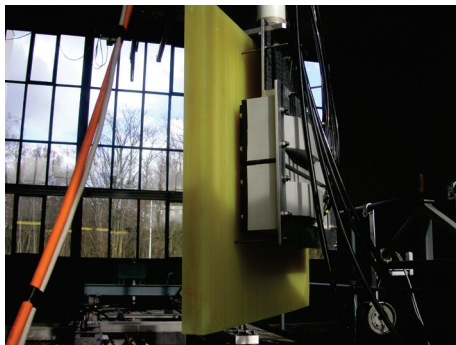


Abbildung 10: Akustisches Fenster und Sendewandler montiert am Drehgestell vor dem Einbau in den Messtank.

Frequenz von 20 kHz zeigt Abb. 11. Die Ergebnisse der allgemeine Theorie und des FE-Modells sind identisch, lediglich für Winkel oberhalb von 80° Schalleinfall gibt es geringfügige Unterschiede. Die Modellergebnisse zeigen einen sehr geringen TL (kleine 1 dB) bis etwa 30° und zwei Singularitäten bei 33° sowie bei 45°. Die zweite Singularität bei 45° lässt sich dem Winkel der Totalreflektion bezüglich des Übergangs Wasser-Dehnwelle zuordnen. In der Vermessung des akustischen PUR-Fensters deuten sich die im Modell gefundenen Singularitäten nur leicht durch lokale Maxima bei etwa 45° und etwa 55° an. Ein geringer TL von ≤ 4 dB bis zu Schwenkwinkeln von 75° zeigt die hervorragenden akustischen Eigenschaften des gewählten PUR für die vorgestellte Anwendung.

Die Unterschiede zwischen Simulation und Modell beruhen auf der Vernachlässigung der Dämpfung in den Simulationen sowie nicht exakt bekannten Materialparameter des verwendeten PUR. Weiterhin ist kritisch zu hinterfragen, ob die Annahme linear elastischer Materialeigenschaften für das akustischen Fenster aus PUR gerechtfertigt ist. Bei PUR handelt es sich um ein viskoelastisches Material, welches durch ein teilweise viskoses und teilweise elastisches Materialverhalten gekennzeichnet ist. Bei der Glasübergangstemperatur, die für das verwendete Material im Bereich der Einsatzbedingungen liegt, ändert sich das Materialverhalten vom spröden energieelastischen Bereich zum gummiartigen entropieelastischen Bereich. Ein solches Materialverhalten beschreibt weder das FE-Modell noch die allgemeine Theorie.

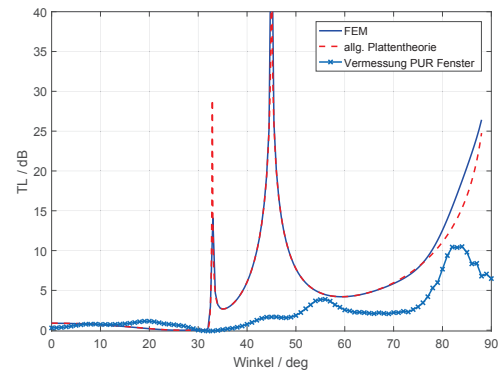


Abbildung 11: Messung und Simulation des Transmissionsverlustes aufgetragen über den Einfallswinkel beim Schalldurchgang durch ein akustisches Fenster aus PUR mit einer Dicke von 70 mm. Die Messfrequenz beträgt 20 kHz.

Zusammenfassung

Es wurden gezeigt, dass die Formulierung der allgemeinen Theorie der Plattendurchschallung nach Wittek in sehr guter Übereinstimmung mit einem FE-Modell des selben Problems ist. Bei einem realisierten akustischen Fenster aus PUR für eine 20 kHz Fächerlotanlage war der Durchgangsverlust auch für große Schwenkwinkel bis zu 75° unterhalb von 4 dB. Mit diesem geringen Verlust ist das verwendete Material hervorragend für die vorgestellte Anwendung geeignet. Der Vergleich von Simulation und Messung des PUR Fensters weisen noch deutliche Unterschiede auf, die auf die vernachlässigte Dämpfung in den Modellen sowie unvollständig beschriebenes Verhalten des Plattenmaterials zurückgeführt werden kann. Hier sind noch weitere Untersuchungen durchzuführen.

Literatur

- [1] Blackstock, D.T.: Fundamentals of physical acoustics. A Wiley-Interscience Publication, New York, 2000, ISBN 0-471-31979-1.
- [2] Brekhovskikh, L.M.; Godin, O.A.: Acoustics of layered media I. Springer-Verlag, Berlin, 1990, ISBN 3-540-64724-4.
- [3] Haberkern, R.: On how to obtain diffuse field sound transmission loss from Cremer's thin plate transmission coefficient formula. Acta Acoustica 87 (2001), 542-551.
- [4] Wittek, G.: Schalltransmission bei Platten und ebenen Schichtstrukturen. Eigenverlag Atlas Elektronik GmbH, Bremen, 2006, ISBN 3-936799-29-6.