



(c) Trianel – Hero Lang

Wasserschall (Hydroakustik)

Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks

Akustik-Serie Teil 14

Wasserschall besteht seiner physikalischen Natur nach aus mechanischen Schwingungen, die sich, wie der Name schon sagt, im Wasser, aber auch in anderen Flüssigkeiten ausbreiten können. Genauso wie beim Luftschall werden diese Schwingungen durch zwei Feldgrößen vollständig beschrieben, nämlich durch den Schalldruck p und durch die Schallschnelle v . Letztere ist eine vektorielle Größe. Beim Wasserschall ist der Schalldruck ein Wechseldruck, der in Gewässern dem tiefenabhängigen hydrostatischen Druck p_0 überlagert ist.

Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die Ausbreitung von Schall erfolgt in Flüssigkeiten generell nur in Form von Längs- oder Longitudinalwellen, und zwar mit einer Geschwindigkeit $c = \sqrt{K/\rho}$. Darin sind K der Kompressions- oder Volumenelastizitätsmodul und ρ die Dichte der jeweiligen Flüssigkeit. Genauso wie in anderen Medien ist die Schallgeschwindigkeit auch in Flüssigkeiten abhängig von der Temperatur. Bei 10 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit in Wasser 1440 m/s. Das Bild 1 zeigt einige Zahlenwerte für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in anderen Flüssigkeiten. Bei Meerwasser hat außerdem der Salzgehalt Einfluss auf die Höhe der Schallgeschwindigkeit.

Eine weitere, sehr wichtige Kenngröße ist die Schallkennimpedanz Z_0 (früher: Wellenwiderstand), die für Wasser einen um etwa vier Größenordnungen höheren Wert hat als diejenige für Luft ($Z_{0, \text{Luft}} = 408 \text{ Ns/m}^3$):

$$Z_{0, \text{Wasser}} = p/v = \rho \cdot c = 1,44 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$$

Dieser sehr hohe Wert hat entscheidenden Einfluss auf die Wahl des für Wasserschallsender optimal geeigneten Wandlerprinzips. Um im Wasser „brauchbare“ Werte für die Schwingungsschnelle zu erzeugen, müssen Wasserschallsender eine relativ große Schwingungskraft aufbringen und ins

Wasser einleiten. Das aber erreicht man vorzugsweise nur mit magnetostriktiven und piezoelektrischen Sendesystemen. Mehr darüber folgt im weiteren Verlauf dieses Beitrags.

Der um vier Größenordnungen verschiedene Wert zwischen den Schallkennimpedanzen von Wasser und Luft hat auch einen sehr wesentlichen Einfluss auf die

Flüssigkeit	Schallgeschwindigkeit in m/s
Azeton	1190
Äthylalkohol	1180
Benzol	1326
Methylalkohol	1123
Quecksilber	1451

Bild 1: Ausbreitungsgeschwindigkeit $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ von Schall in verschiedenen Flüssigkeiten bei einer Temperatur von 20 °C.



Zur Information:

In leicht verständlicher Form vermitteln wir eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik.**

Themengebiete:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren (ELVjournal 2/2019)
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption (ELVjournal 3/2019)
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder (ELVjournal 4/2019)
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze (ELVjournal 5/2019)
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon (ELVjournal 6/2019)
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer (ELVjournal 1/2020)
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox (ELVjournal 2/2020)
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler (ELVjournal 4/2020)
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche (ELVjournal 4/2020)
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie (ELVjournal 5/2020)
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“ (ELVjournal 6/2020)
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Impedanz-Messrohre und Hallräume (ELVjournal 1/2021)
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker (ELVjournal 2/2021)
- **Wasserschall (Hydroakustik) – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks**
- Infraschall und Ultraschall – natürliche und industrielle Quellen
- Akustische Messtechnik – Terz- und Oktavpegel, Intensitätsmessung, Korrelationsanalyse, Cepstrumanalyse und akustische Peilung

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

Schallausbreitung im Wasser, das an Luft angrenzt. Die Luft stellt für den Schall, der aus dem Wasser kommt, eine schallweiche Grenzfläche dar, an der es zu einer Totalreflexion kommt. Die Schallschnelle v erreicht dort ein Maximum, während der Schalldruck p dort auf seinen Minimalwert absinkt, siehe Bild 2. Der Wasserschall wird an dieser Grenzfläche total reflektiert, sodass außerhalb des Wassers nichts davon zu hören ist (Bild 3). Der Wasserschall erfährt an dieser Trennfläche eine Vielzahl von Reflexionen, er kann das Wasser nicht verlassen. Man hört ihn außerhalb des Wassers nicht. Ein flacher See z. B. wirkt wie ein Hallraum. Unter diesem Effekt haben beispielsweise höher entwickelte Meeresbewohner zu leiden, wenn in ihrer Umgebung Fundamente für Windgeneratoren in den Meeresboden gerammt werden oder wenn sich in deren Umgebung Wasserfahrzeuge mit Höchstgeschwindigkeit fortbewegen. Meeresbewohner verlieren dadurch häufig die Orientierung.

Der für die Bildung des Schalldruckpegels wichtige Bezugsschalldruck hat für den Wasserschall ebenfalls einen anderen (!) Wert als für den Luftschall. Der Bezugsschalldruck für den Wasserschallpegel beträgt $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$, im Gegensatz zum Bezugsschalldruck beim Luftschall mit einem Wert von $20 \mu\text{Pa}$, der von der menschlichen Hörschwelle herrührt.

Betrachtet man noch einmal die sehr unterschiedlichen Schallkennimpedanzen von Luft und Wasser, so hat das auch beachtliche Auswirkungen auf die Höhe der in beiden Medien abgestrahlten Schallintensität I , bzw. Schallleistung W_{ak} . Die gleiche Schallintensität, abgestrahlt in Luft und in Wasser, hat im Wasser einen um den Faktor

$$\sqrt{\frac{Z_{o,Wasser}}{Z_{o,Luft}}} = \sqrt{\frac{1,44 \cdot 10^6}{408}} = \sqrt{3529} = 59,4$$

höheren Schalldruck zur Folge als in Luft. Das ist ein Unterschied von etwa 35,5 dB. Berücksichtigt man dann auch noch die unterschiedlichen Werte für den Bezugsschalldruck für Luft- und Wasserschall, nämlich $20 \mu\text{Pa}$ und $1 \mu\text{Pa}$, so sind das noch einmal zusätzlich 26,0 dB, d. h. somit insgesamt $35,5 + 26,0 = 61,5 \text{ dB!}$

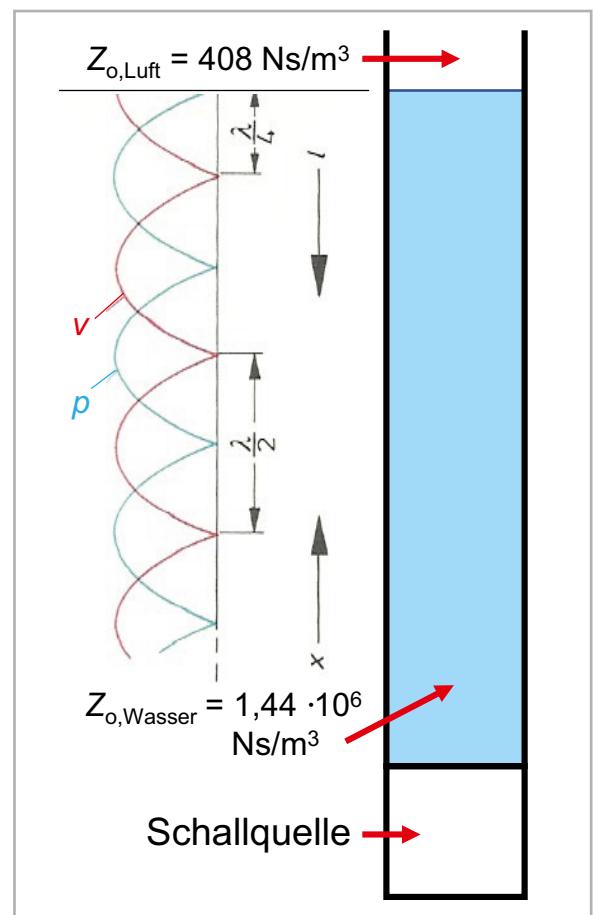


Bild 2 Räumliche Verteilung von Schalldruck p und Schallschnelle v in einer stehenden Welle bei totaler Schallreflexion an einer schallweichen Grenzfläche, hier zwischen Wasser (sehr große Schallkennimpedanz $Z_{o,Wasser}$) und angrenzender Luft (sehr kleine Schallkennimpedanz $Z_{o,Luft}$); schematische Darstellung

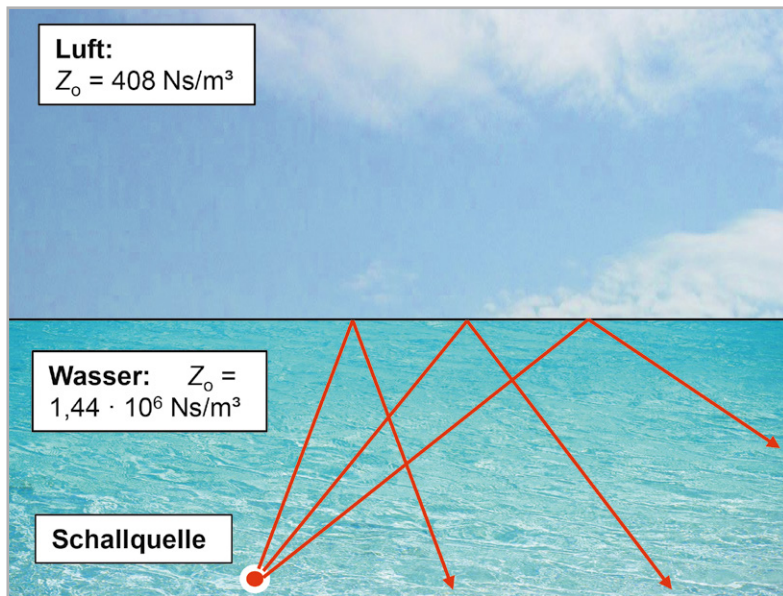


Bild 3: Schallquelle unter Wasser: Alle von ihr ausgehenden Schallstrahlen werden von der Grenzfläche zur Luft zurückreflektiert (Totalreflexion). Oberhalb der Wasseroberfläche hört man nichts!

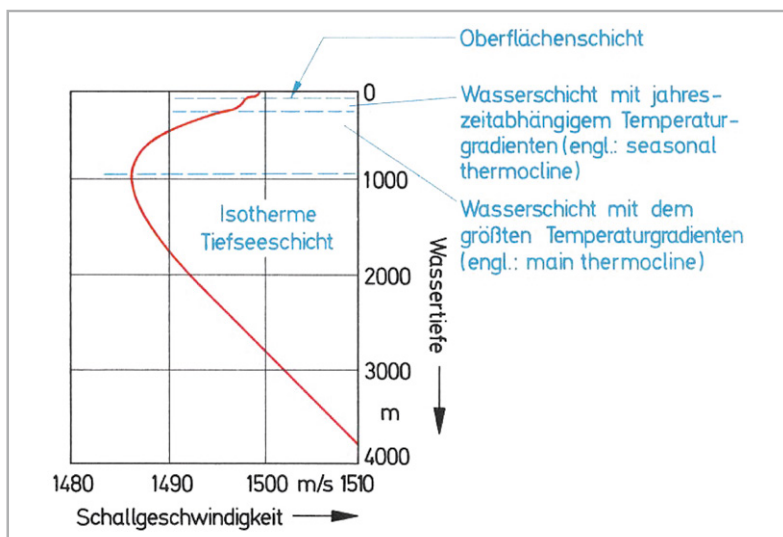


Bild 4: Typisches Tiefsee-Schallgeschwindigkeitsprofil: Abhängigkeit der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c_{Wasser} von der Wassertiefe. Man erkennt darin ein charakteristisches Minimum bei einer bestimmten Wassertiefe.

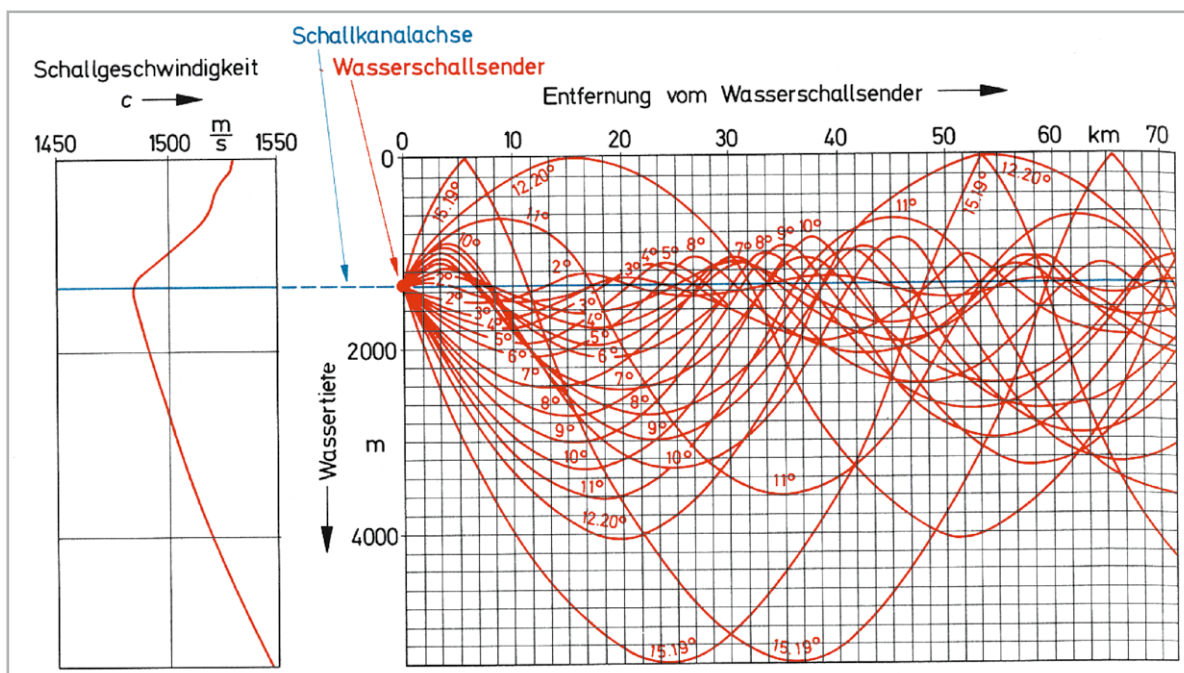


Bild 5: Tiefsee-Schallkanal: rechts: Schallstrahlendiagramm für ein horizontal in Richtung Tiefseekanal abgestrahltes Schall-Strahlenbündel. Das linke Bild zeigt das dazugehörige, tiefenabhängige Schallgeschwindigkeitsprofil. Der Wasserschallsender befindet sich in einer Wassertiefe, in der die Schallgeschwindigkeit ihr Minimum hat. Dort befindet sich die Schallkanalachse (SOFAR-channel).

Tiefsee-Schallgeschwindigkeitsprofil und Schalldämpfung im Meer

In sehr tiefen Gewässern, z. B. im Meer, beobachtet man eine sehr starke Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der Wassertiefe. Das Bild 4 zeigt ein typisches Tiefsee-Schallgeschwindigkeitsprofil mit einem ausgeprägten Minimum in einer bestimmten Wassertiefe.

Das dort gezeigte Profil lässt sich in mehrere Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften unterteilen. Unterhalb der Meeresoberfläche befindet sich zunächst die sogenannte Oberflächenschicht, in der die Schallgeschwindigkeit den täglichen Schwankungen der Wassererwärmung und -abkühlung folgt. Unterhalb der Oberflächenschicht befindet sich eine Wasserschicht mit jahreszeitabhängigem Temperaturgradienten (engl.: seasonal thermocline). Das Kennzeichen dieser Wasserschicht ist ein negativer Temperaturgradient, dessen Größe sich mit der Jahreszeit ändert (daher: seasonal). Das Gleiche gilt entsprechend auch für den Schallgeschwindigkeitsgradienten.

Im Sommer und im Herbst, solange das oberflächennahe Meerwasser stark erwärmt ist, ist der schräge Verlauf dieser Thermocline sehr ausgeprägt. Unterhalb dieser jahreszeitabhängigen Thermocline folgt die Wasserschicht mit dem größten Temperaturgradienten (engl.: main thermocline). Und unterhalb dieser Schicht befindet sich schließlich die sogenannte isotherme Tiefseeschicht, die bis zum Meeresboden reicht. Der in dieser Wasserschicht mit zunehmender Wassertiefe zu beobachtende Anstieg der Schallgeschwindigkeit beruht auf der Wirkung der hydrostatischen Druckzunahme zum Meeresboden hin.

Zwischen dem negativen Geschwindigkeitsgradienten der Hauptthermocline und dem positiven Gradienten der isothermen Tiefseeschicht befindet sich ein Schallgeschwindigkeitsminimum, in dessen Meerestiefe die Ausbreitungsrichtung von Wasserschall in horizontaler Richtung durch Brechung derart verändert wird, dass eine horizontale Schallübertragung

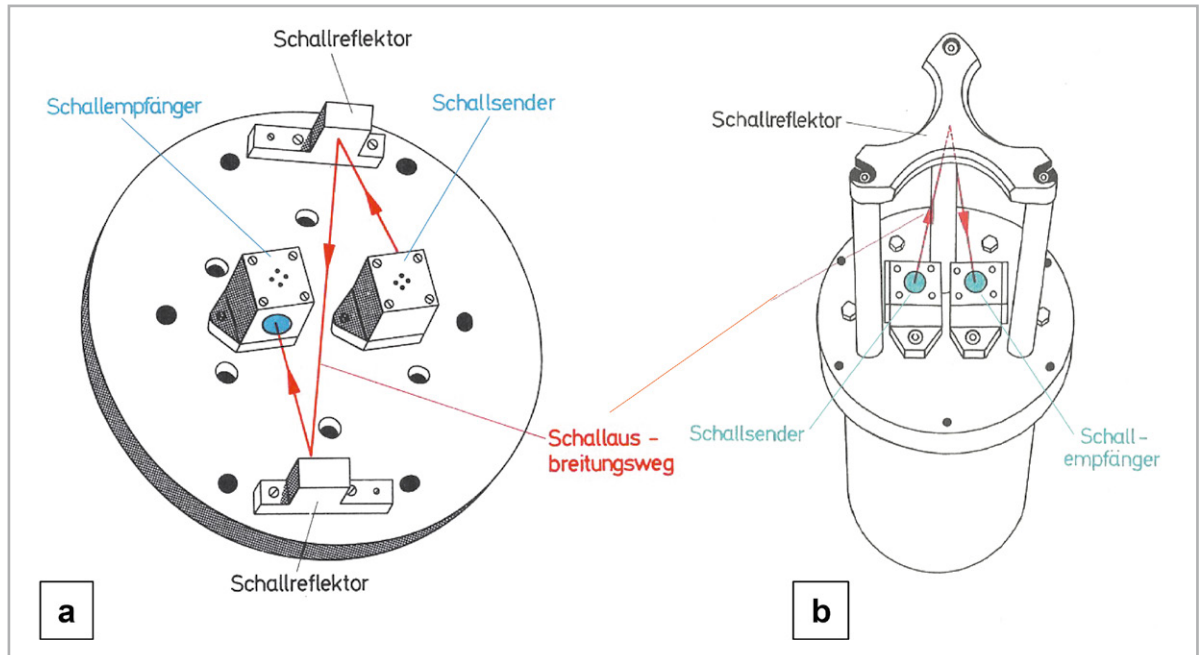


Bild 6: Messung der tiefenabhängigen Schallgeschwindigkeit im Meerwasser.
 a: Tiefsee-Schallgeschwindigkeitsmesser, bestehend aus einem Sende- und einem Empfangswandler sowie aus zwei Schallreflektoren.
 b: Tiefsee-Schallgeschwindigkeitsmesser mit nur einem Schallreflektor.

über sehr große Entfernungen hinweg wie durch einen „Kanal“ hindurch möglich wird, siehe dazu auch das Schallstrahlendiagramm für ein horizontal ausgerichtetes Strahlenbündel in Bild 5.

Befinden sich der in horizontaler Richtung abstrahlende Wasserschallsender und das Minimum des Schallgeschwindigkeitsprofils in gleicher Wassertiefe, so erzielt man in dieser Tiefe eine Schallübertragung über extrem große Entfernungen, quasi wie durch einen „Schallkanal“ hindurch. In der englischsprachigen Literatur bezeichnet man diesen Kanal auch als „deep sound channel“ oder auch als „SOFAR-channel“ (= Sound Fixing And Ranging).

Zur Messung der momentan herrschenden Schallgeschwindigkeit im Wasser benutzt man eigens zu diesem Zweck geschaffene Schallgeschwindigkeitsmesser (engl.: velocimeter), siehe Bild 6. Sie bestehen im Prinzip aus zwei Wasserschallwandlern, einem Sender und einem Empfänger mit genau bekannter akustischer Entfernung zwischen beiden sowie einem oder zwei Reflektoren. Aus der Laufzeit von kurzzeitigen Schallimpulsen zwischen Sender und Empfänger kann die momentan herrschende Schallgeschwindigkeit im Wasser bestimmt werden. Um eventuelle Mehrdeutigkeiten infolge unkontrollierbarer Reflexionen auszuschließen, wurde für die Messstrecke zwischen Sender und Empfänger kein gerader Weg vorgesehen, sondern eine durch gezielt angeordnete Schallreflektoren geknickte Strecke.

Neben der Schallgeschwindigkeit ist des Weiteren die Schallabsorption oder Schalldämpfung durch das Meerwasser (in dB/km) eine sehr wichtige Größe für die Meeresakustik, siehe dazu Bild 7. Die dort blau gestrichelt eingezeichnete Gerade beschreibt die klassische Absorption, die nur die innere Reibung berücksichtigt. Die tatsächliche Dämpfung im Meerwasser (rote Darstellung) wird nicht nur gemäß der klassischen Theorie allein durch Reibung bestimmt, son-

dern auch durch molekulare Umlagerungen in der Ionenstruktur des Wassers, siehe dazu auch die beiden Knicke in der roten Darstellung. Wie die Grafik aber generell zeigt, steigt die Dämpfung sehr steil mit der Frequenz an. Die Dezibelangabe bezieht sich dort auf das Verhältnis der Schallintensitäten (!), und zwar zu Beginn und am Ende einer 1 km langen Messstrecke.

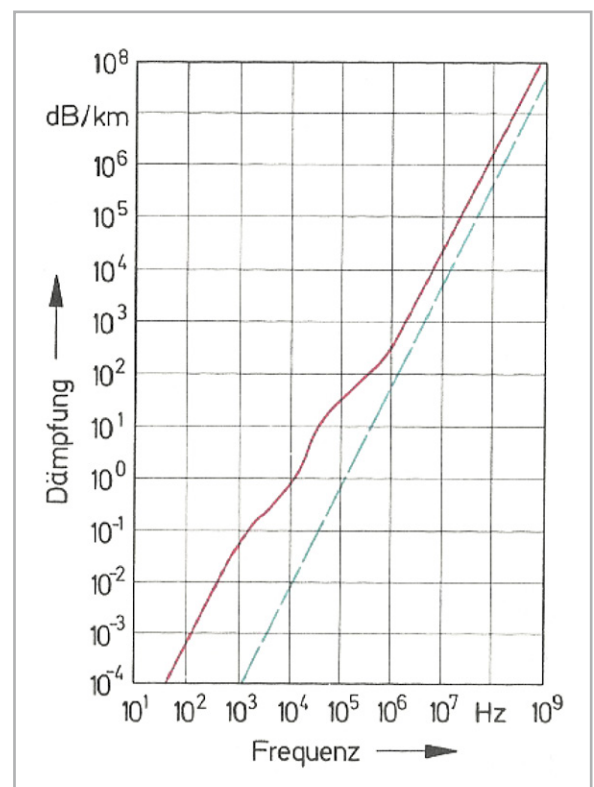


Bild 7: Schallabsorption oder -dämpfung in dB pro km im Meerwasser in Abhängigkeit von der Frequenz. Die blau gestrichelte Linie kennzeichnet die klassische Absorption, die nur durch Reibung zustande kommt. Die rot durchgezogene Kurve weist außer auf Reibungsverluste auch auf zusätzliche molekulare Umlagerungen in der Ionenstruktur des Wassers hin.

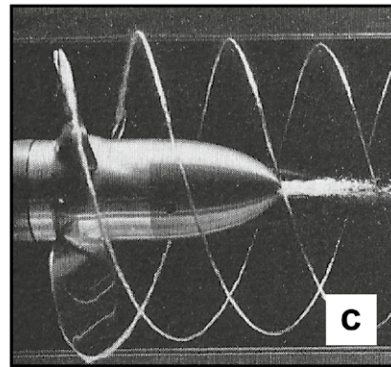
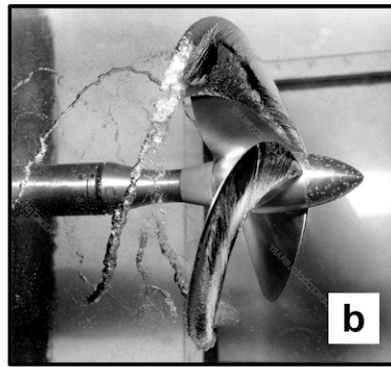
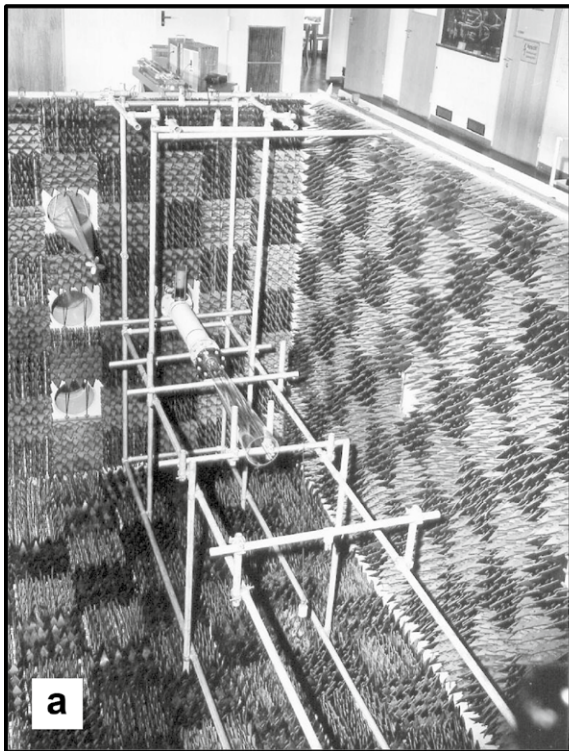
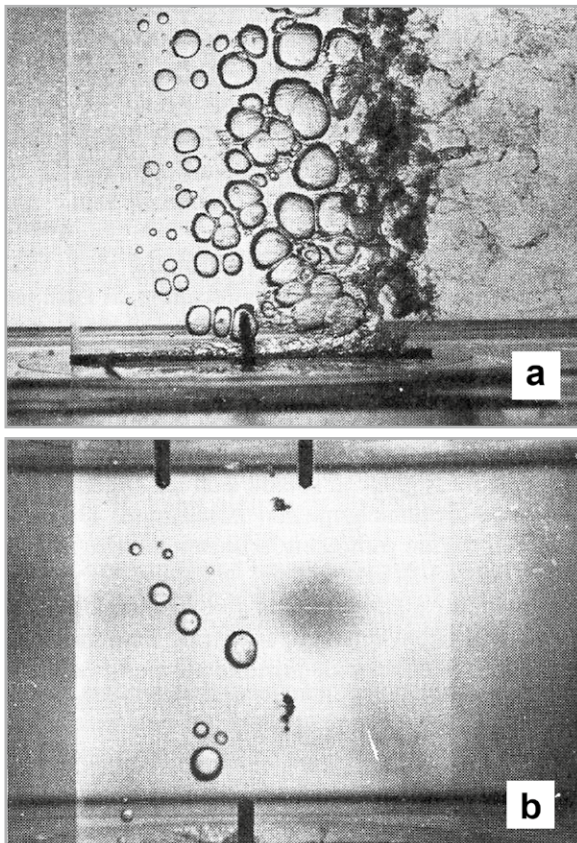


Bild 8: Schallabsorbierend ausgekleideter Wasserschallmesstank bei abgelassenem Wasser. Die Auskleidung besteht meist aus nebeneinander aufgereihten keilförmigen (Neopren-)Gummilamellen von unterschiedlicher Länge. Die Lamellen enthalten Poren bzw. Hohlräume, sodass sie dem Wasser gegenüber außerordentlich kompressibel erscheinen. Mit derartigen Anordnungen erzielt man eine sehr gute Absorption über einen relativ breiten Frequenzbereich hinweg (hier: etwa 5 bis 70 kHz).

*a) Messtank mit Einbauten zur Untersuchung von kavitierenden Schiffspropellern (Quelle: Ivar Veit, „Flüssigkeitsschall“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1979)
b) und c) Beispiele für die Erzeugung von Kavitationsblasen durch Propeller*

Aus der Grafik geht auch hervor, aus welchem Grunde man z. B. für die Schallortung über sehr große Entfernungen hinweg, wegen der dafür außerordentlich kleinen Dämpfungswerte, stets nur tiefe Frequenzen verwendet.



*Bild 9: Ausbildung von Kavitationsblasen an einem angeströmten Profil bei verschiedenen Keimzahlen in der Anströmung
a) Frisch eingelassenes Leitungswasser (mit darin gelöster Luft)
b) Wasser stark entgast
Aus: Ivar Veit, „Flüssigkeitsschall“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1979*

Kavitation

Ein ganz besonderer, nur in Flüssigkeiten auftretender Effekt, ist die Kavitation. Darunter versteht man die Bildung kleiner mit Luft (Gas) gefüllter Hohlräume. Sinkt der statische Druck p_{st} in einem bestimmten Gebiet einer strömenden Flüssigkeit, z. B. bei der Bewegung von Schiffspropellern, bis auf den Dampfdruck p_D der Flüssigkeit ab oder unterschreitet er diesen sogar, so entstehen bei Vorhandensein von sogenannten Kavitationskeimen, gas- oder dampfgefüllten Hohlräumen, nämlich sogenannte Kavitationsblasen. Geraten diese Blasen danach in Gebiete, in denen der Umgebungsdruck wieder größer ist als der Dampfdruck, stürzen sie implusionsartig zusammen (Blasen kollaps).

Beide Vorgänge sind von einer sehr heftigen Geräuschentwicklung begleitet. Kavitationsgeräusche treten beispielsweise auch bei rotierenden Schiffspropellern auf, z. B. in abgelösten Spitzen- und Nabenwirbeln von Schiffspropellern, siehe **Bild 8b und c**.

Das **Bild 8a** zeigt einen reflexionsfrei ausgekleideten Wasserschallmesstank (später mehr darüber), in dem unter anderem auch kavitierende Schiffspropeller untersucht werden können. Den Kavitationseffekt macht man sich sogar zunutze, und zwar beim Lötten von Aluminium. Ohne Zuhilfenahme der Kavitation im flüssigen Zinn wäre das Lötten von Aluminium sonst nicht möglich.

Kavitationsgeräusche setzen sich aus zwei Geräuschanteilen zusammen. Den einen Teil bilden pulsierende Blasen-schwingungen, während der zweite Anteil beim Blasen-kollaps (= Stoßwelle) entsteht. Kavitationsblasen können auch an angeströmten Profilen entstehen. **Bild 9** zeigt derartige Kavitationsblasen bei verschiedenen Keimzahlen in der Anströmung. Ist der Keimgehalt einer Flüssigkeit hoch, so setzt die Kavitation schon bei relativ niedrigen Anströmgeschwindigkeiten ein.

Wasserschallwandler

Zur Erzeugung und zum Empfang von Wasserschall verwendet man bevorzugt das magnetostriktive und das piezoelektrische Wandlerprinzip. Die hohe Schallkennimpedanz von Wasser $Z_{o,Wasser}$ verlangt nach Schallsendern, die fähig sind, vor allem relativ hohe Schwingungskräfte zu erzeugen und ins Medium Wasser einzuleiten.

Magnetostriktive Schallwandler arbeiten auf der Grundlage der Anwendung des direkten bzw. des indirektiven magnetostriktiven Effekts

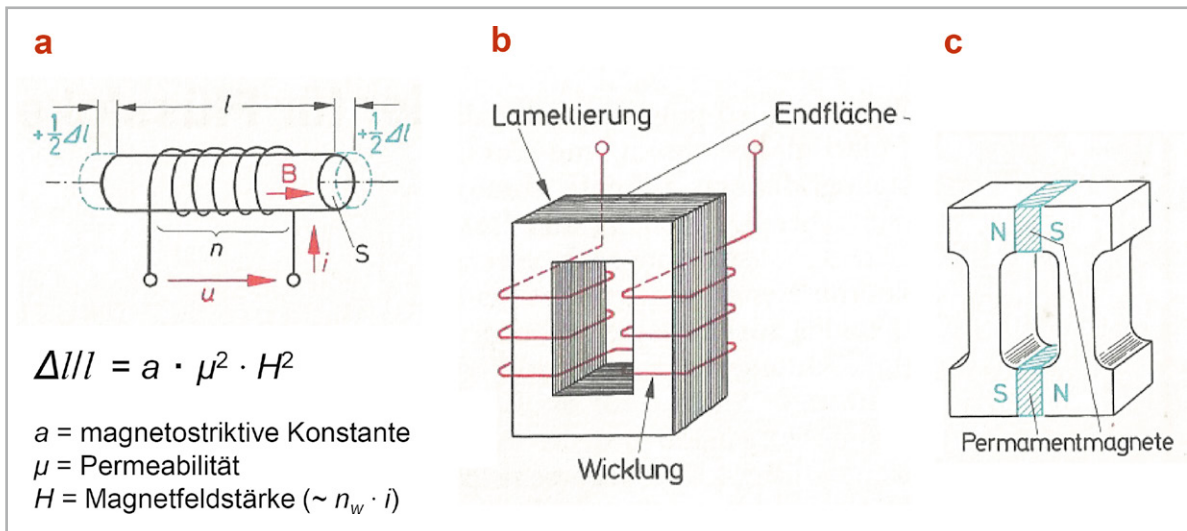


Bild 10: Magnetostruktiver Effekt, hier erläutert für den Sendebetrieb
 a) Stabschwinger (hier: bei positiver Ausdehnung $+\Delta l/l$ der beiden Endflächen)
 b) Lamellierter Flachsinger (die Lamellierung dient der Minimierung von Wirbelströmen)
 c) Flachsinger bestehend aus hantelförmigen Schwingerelementen mit dazwischen befindlichen Permanentmagneten zur Vermeidung von Schwingungen doppelter Frequenz infolge der quadratischen Abhängigkeit (von H^2)
 Wird eine Endfläche des Stabes bzw. des Flachsingers fest eingespannt, so erfolgt die Schallabstrahlung (z. B. ins Wasser) nur von der anderen Endfläche des Stabes bzw. des Flachsingers.

(erstmalig beobachtet 1847 von J. P. Joule). Die einfachste Ausführung eines magnetostruktiven Wandlers besteht aus einem Stab aus magnetostruktivem Material, z. B. Nickel, der eine Wicklung trägt, siehe Bild 10. Wird die Wicklung von einem elektrischen Strom i durchflossen, so erfährt der Stab infolge der dadurch erfolgten Magnetisierung eine magnetostruktive Längenänderung $\Delta l/l$ in Richtung der Längsachse, die der im Bild 10 a gezeigten Beziehung folgt. Infolge der quadratischen Abhängigkeit von der Induktion bzw. von der magnetischen Feldstärke H führt der Stab – ohne eine Gleichfeld-Vormagnetisierung – Längsschwingungen mit der doppelten Erregerfrequenz aus. Um das zu verhindern, werden magnetostruktive Schwinger durch ein Gleichfeld vormagnetisiert, was in der Praxis meist mittels eines Permanentmagneten erfolgt, siehe Bild 10 c. Die Schallabstrahlung erfolgt dabei von den beiden Endflächen des Stabes bzw. von nur einer Endfläche, sofern das andere Stabende fest eingespannt ist. Die relativen Längenänderungen liegen üblicherweise im Bereich von $\pm 10-100 \cdot 10^{-6}$.

Neben dem klassischen magnetostruktiven Stabschwinger kommen in der Praxis hauptsächlich Flach- oder Rahmschwinger zum Einsatz, siehe Bild 10 b. Magnetostruktive Wandler gehören zu den reversiblen Wandlern, d. h., sie können sowohl als Schallsender als auch als Schallempfänger eingesetzt werden.

Das Bild 11 zeigt zwei Beispiele von magnetostruktiven Sende-Empfangsschwingern, wie sie zum Einsatz für Fischerei- und Sonaranlagen (Fischlupe, Echolot zur Lotung der Wassertiefe) geschaffen wurden und immer noch verwendet werden. Diese Ausführungen sind schwenkbar, und zwar sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung.

Piezoelektrische Schallwandler arbeiten auf der Grundlage des direkten bzw. indirekten piezoelek-

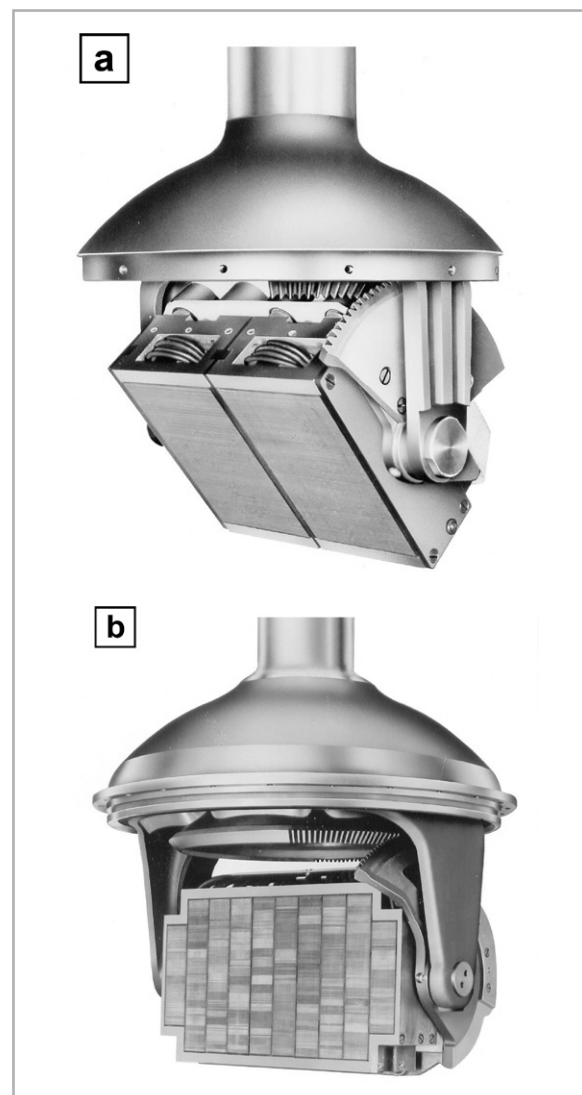


Bild 11: Beispiele von drehbaren und schwenkbaren magnetostruktiven Panorama-Sende-Empfangsschwingern, z. B. für Fischerei- und Sonaranlagen (zur Vertikal- und Horizontalortung). Der Schwinger in der Darstellung b kann bis zu 9 getrennte Suchstrahlen aussenden mit einer Sendeleistung von je 4 kW pro Sendestrahle bei einer Reichweite von ca. 4000 m.

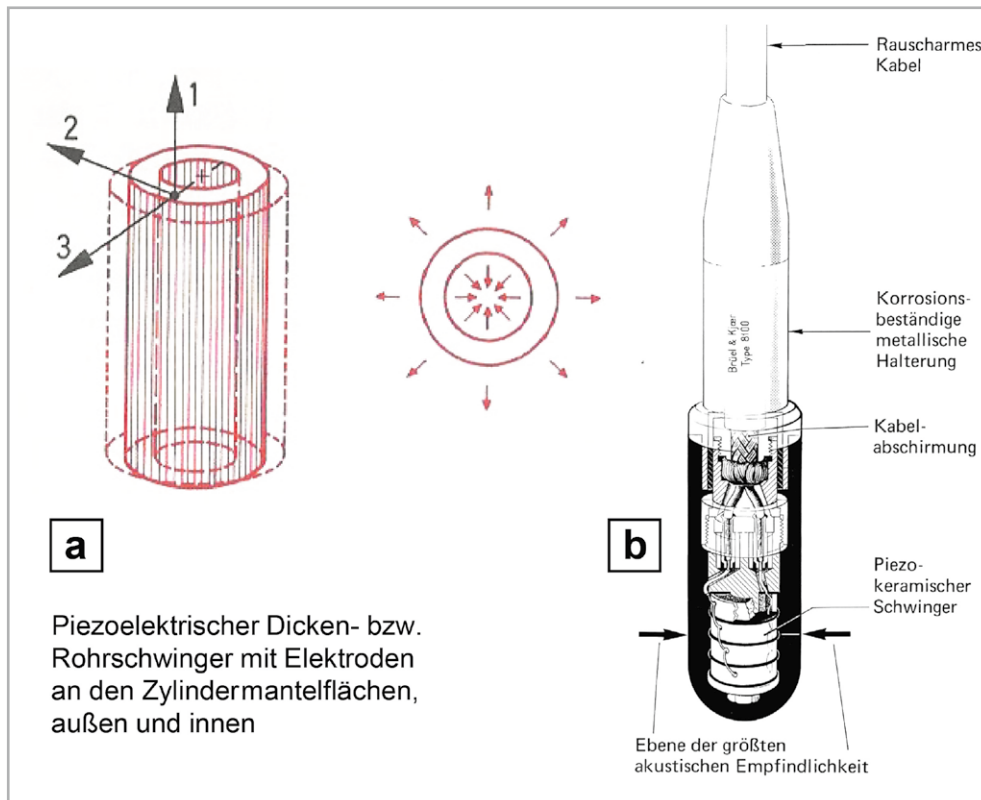


Bild 12: Piezokeramischer Wasserschall-Empfänger (Hydrofon)
 a) Rohrschwinger-Typ, mechanisch schwingend in radialer Richtung
 b) Beispiel für den konstruktiven Aufbau eines Hydrofons (Brüel & Kjaer), Länge: 12 cm, Durchmesser: 2,1 cm. Rohrschwinger-Typ, bestehend aus 4 Einzellelementen, die elektrisch parallel geschaltet und mechanisch zu einem Hohlzylinder zusammengesetzt sind. Richtcharakteristik: Omnidirektional. Frequenzgang: linear bis weit über 100 kHz hinaus, verwendbar bis zu einer Meerestiefe von ≥ 1000 m

trischen Effekts (erstmalig beobachtet um 1880 von den Gebrütern Jacques und Pierre Curie). Auch dieser Wandlertyp gehört zu den reversiblen Wandlern. Zu den klassischen piezoelektrischen Materialien (Quarz, Seignettesalz, etc.) sind heutzutage für die technische Anwendung hauptsächlich piezoelektrische Keramiken (Bariumtitanat (BaTiO_3), Bleizirkonattitanat (PZT)) sehr wichtig, und das gilt natürlich auch für den Wasserschall.

Stellvertretend für die Gesamtheit aller piezoelektrischen Wasserschallwandler soll hier lediglich auf den piezokeramischen Wasserschallempfänger, d. h. auf das Hydrofon, näher eingegangen werden. Die

dabei gemachten Hinweise und Anmerkungen gelten im Prinzip generell auch für die anderen Ausführungen piezoelektrischer Wasserschallwandler.

Im Bild 12 ist der Aufbau eines piezokeramischen Hydrofons dargestellt, wie es für den Einsatz in größeren Meerestiefen (1000 m und mehr) verwendet wird. Der Frequenzgang ist linear bis weit über 100 kHz hinaus. Mit Hydrofönen kann neben Kavitationsgeräusch-Messungen unter anderem auch das Verhalten von höher entwickelten Meeresbewohnern (Wale, Delfine, Schweinswale) untersucht werden. Letztere leiden sehr, wenn in ihrer Umgebung z. B. Fundamente von Windgeneratoren in den Meeresboden gerammt werden oder wenn sich in ihrer Umgebung Wasserfahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit bewegen. Meeresbewohner verlieren dadurch häufig die Orientierung.

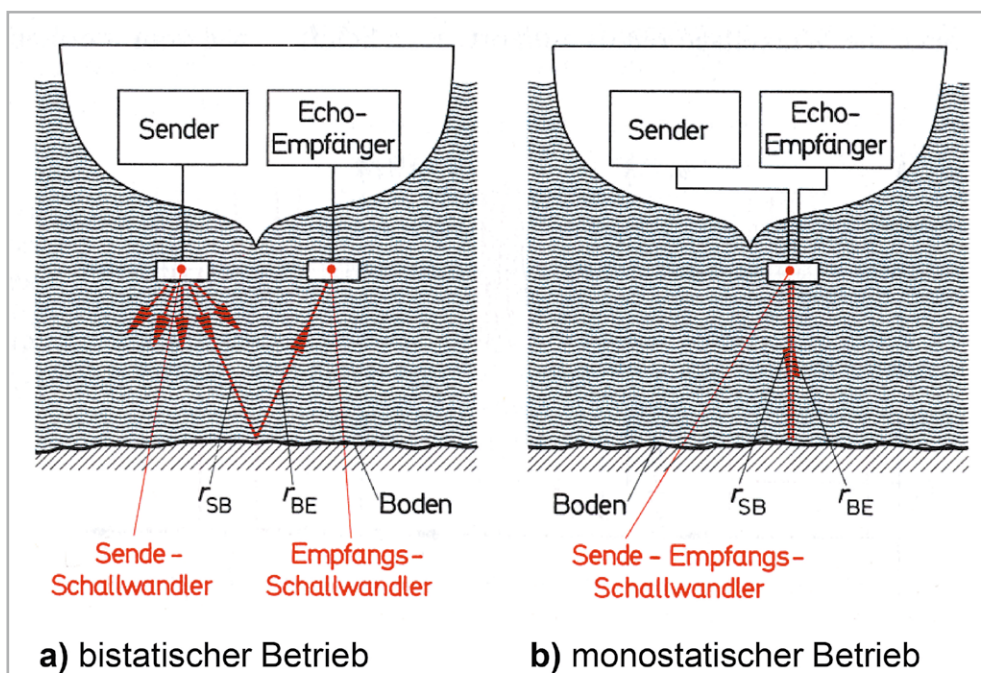


Bild 13: Sonarortung (sound navigation and ranging) – Prinzip der vertikalen Echo-otung. Die aktive Sonarortung stellt im Prinzip eine Echo-otung dar. Man unterscheidet dabei zwischen a) der bistatischen und b) der monostatischen Betriebsweise. Im ersten Falle werden zum Senden und Empfangen getrennte Schallwandler verwendet, während im letzteren Falle mit demselben Wasserschallwandler gesendet und empfangen wird.



Schallortung im Meer – Sonar

Wenn von Schallortung im Meer die Rede ist, fällt meist immer das Wort Sonarortung. Das Kunstwort Sonar (= sound navigation and ranging) ist eine Art Gegenstück zum anderen bekannten Kunstwort Radar (= radio detecting and ranging).

Die Sonarortung stellt im Prinzip eine Echoortung dar, bei der man wiederum zwischen einer Vertikalortung und einer Horizontalortung unterscheidet. Des Weiteren unterscheidet man zwischen einem bistatischen und einem monostatischen Betrieb. Beim bistatischen Betrieb werden zum Senden und zum Empfangen zwei separate Schallwandler verwendet, während beim monostatischen mit ein und demselben Wasserschallwandler gesendet und empfangen wird, siehe [Bild 13](#).

Die Vertikalortung dient z. B. zur Bestimmung der Wassertiefe unter dem Kiel und zur Auffindung von Fischschwärmen. Die für die aktive Sonarortung in der Anfangszeit verwendeten Schallsignale kann man in drei verschiedene Klassen einteilen, und zwar a) in trägerfrequente Schallimpulse (CW-Impulse), b) in frequenzmodulierte Schallimpulse (FM-Impulse) und c) in kodierte Schallimpulse.

Die größtmögliche horizontale Ortungsentfernung (= Reichweite) hat ihre Grenzen. Diese hängen vor allem von der Intensität des Sendesignals, von der Empfindlichkeit des Empfängers und vom Ausmaß auftretender Störungen ab. Nicht zuletzt spielt dabei aber auch die Schalldämpfung durch das Meerwasser eine Rolle, siehe auch [Bild 7](#).

Bei sehr tiefen Frequenzen ist die Schalldämpfung durch das Meerwasser nur sehr gering. Bei 100 Hz z. B. beträgt sie lediglich etwa 10^{-3} dB pro km! Sie nimmt aber sehr schnell mit wachsender Frequenz zu. Bei 10 kHz beträgt sie bereits 1 dB pro km, entsprechend 100 dB auf 100 km oder 54 Seemeilen.

Wasserschall-Messtechnik

Ein Großteil der akustischen Messtechnik im bzw. unter Wasser befasst sich neben der Untersuchung an Wasserschallabsorbern mit der Kalibrierung von Wasserschallwandlern. Für derartige Prüfungen wurden spezielle Messtanks geschaffen, in denen man, zumindest für einen bestimmten Frequenzbereich, akustische Freifeldbedingungen erzeugen kann. Weiter oben war davon schon die Rede im Zusammenhang mit der Untersuchung an kavitierenden Schiffspropellern, siehe [Bild 8](#).

Untersuchungen an Wasserschallwandlern verlaufen im Prinzip so ähnlich wie bei Luftschallwandlern, und zwar mit einem möglichst breitbandigen Wasserschallsender in einem Wasserschall-Messbecken, das hier ringsherum mit schallabsorbierenden, keilförmigen Lamellen ausgekleidet ist. Die Keillamellen enthalten Poren bzw. Hohlräume, sodass sie dem Wasser gegenüber außerordentlich „kompressibel“ erscheinen.

Mit derartigen Gummikeil-Anordnungen erzielt man eine gute Schallabsorption über einen sehr breiten Frequenzbereich hinweg, z. B. zwischen etwa 5 bis 70 kHz, siehe dazu auch [Bild 8a](#). Die untere Grenzfrequenz wird in der Hauptsache durch die Keillänge bestimmt, während die obere Grenzfrequenz vom ge-

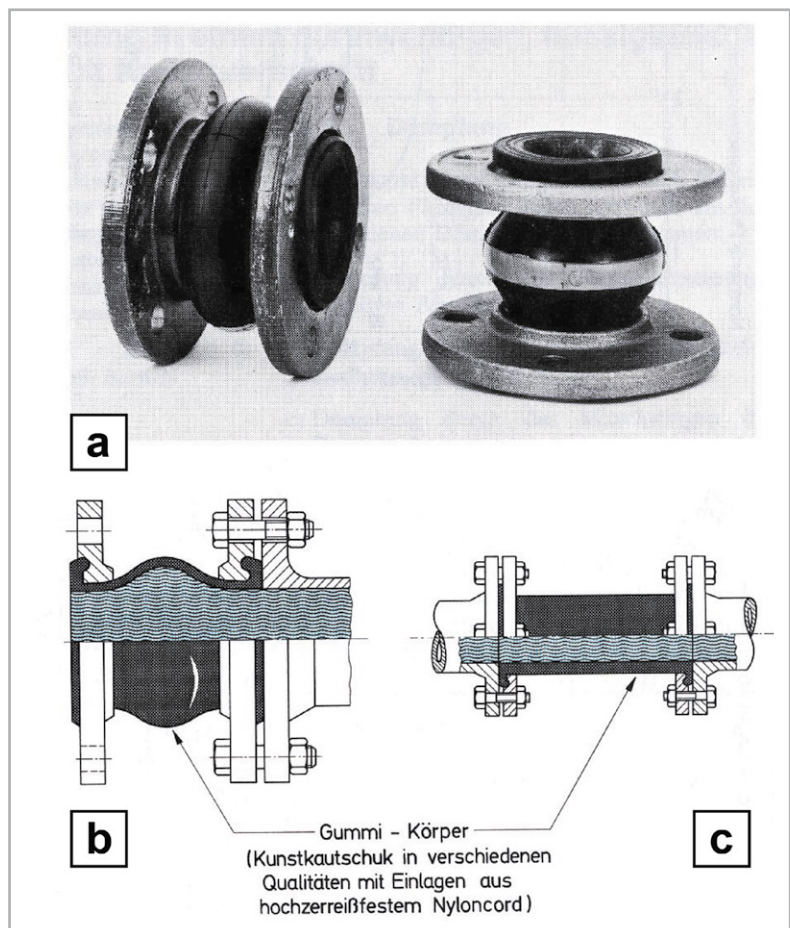


Bild 14: Flexible und schalldämmende Rohrleitungselemente (Gummikompensatoren) zur Verringerung einer Geräuschübertragung über die Wasserfüllung innerhalb von Leitungen a) Balgkompensator, b) und c) Schnittzeichnungen eines Balgkompensators und eines Schlauchkompensators mit angeschlossenen Rohrenden (halb geschnitten dargestellt)

genseitigen Abstand der einzelnen Keillamellen abhängt. Zur Vermeidung von Reflexionen an der oben gegen Luft angrenzenden Wasseroberfläche wird Letztere bei praktischen Messungen ebenfalls mit reflexionsarmen, „schwimmenden“ Breitbandabsorbern abgedeckt.

Weitere Beispiele aus der Praxis

Abschließend noch zwei Beispiele für weitere Bereiche, in denen es darum geht, eine Lärmübertragung bzw. -ausbreitung durch Wasser zu verringern; das sind a) wasserführende und geräuschtransportierende Rohrleitungen und b) Blasenschleier um Trägerpfähle herum für Windkraftanlagen, und zwar zur Lärmreduzierung während Offshore-Rammarbeiten bei der Pfahlversenkung im Meer.

- Die Übertragung von störendem Lärm durch Wasserleitungen kann mithilfe von sogenannten (Gummi-)Kompensatoren sehr wirksam verringert werden, siehe [Bild 14](#). Darunter versteht man flexible Rohrverbindungselemente, die eine „schallweiche“ Unterbrechung der Rohrleitung bilden. Sie wirken wie ein akustisches Sperrglied für die Schallübertragung durch das Wasser. In einem schallweich berandeten Rohr kann sich keine ebene Schallwelle ausbreiten.
- Bei Offshore-Rammarbeiten im Meer zur Errichtung von Windkraftanlagen (Windparks) entsteht Wasserschall mit extrem hohen Pegeln, und das bis zu sehr tiefen Frequenzen herab, was sich vor allem sehr negativ auf die dortigen Meeressäuger (Schweinswale etc.) auswirkt.

Als eine sehr effektive Methode zur räumlichen Eingrenzung derartiger Lärmquellen haben sich sogenannte Blasenschleier bewährt, die man um die in den Untergrund zu rammenden Trägerpfähle erzeugt. Bei diesem Verfahren wird Luft über mehrere am Boden befindliche Schlauch- oder Rohröffnungen unter hohem Druck vom Meeresboden aus ins Wasser ge-



pumpt, von wo aus sie wie ein Blaseschleier nach oben entweicht. Das geschieht ringsherum um den Trägerpfahl. Dabei entsteht so ein Luftblasenvorhang, an dem der Lärm sowohl gestreut als auch durch Reflexion gedämmt wird, siehe Bild 15.

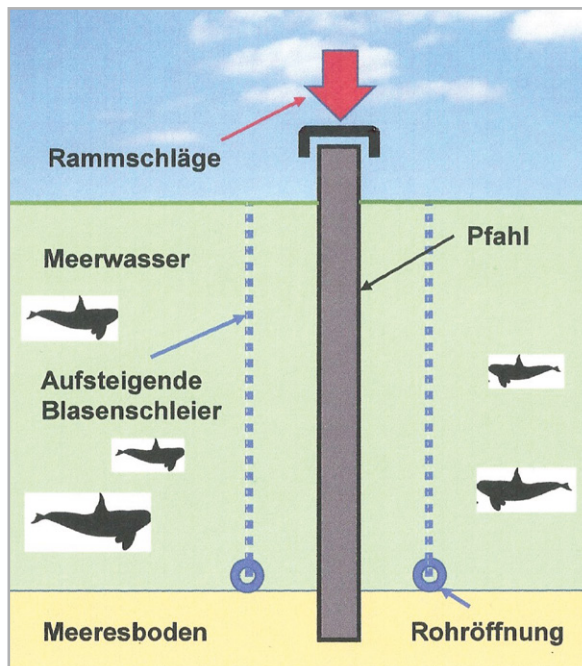


Bild 15: Erzeugung eines nach oben aufsteigenden Blaseschleiers, der den in den Meeresboden einzurammenden Offshore-Pfahl konzentrisch umgibt. Dazu wird durch Rohre, die zum Meeresboden hin verlegt sind, Luft gepumpt, die unten austritt und wie ein Luftblasenvorhang nach oben aufsteigt. Dieser Vorhang hat eine stark lärm-dämmende Wirkung. Auf diese Weise kann die Unterwasserwelt mit ihren Lebewesen gegenüber schädlichem Lärm abgeschirmt und somit geschützt werden.

Ausblick

Der nächste Beitrag befasst sich mit den Themen Infraschall und Ultraschall. Neben grundsätzlichen Betrachtungen über die sehr verschiedenen Frequenz- und Wellenlängenbereiche gehören dazu Hinweise auch darüber, wo natürliche und industriell genutzte Schallquellen dieser Art einem im täglichen Leben begegnen. Dazu gehören natürlich auch Anmerkungen über den Einsatz von Ultraschall in der Medizin, aber auch in der Industrie, z. B. zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, zum Reinigen, zum Erodieren und sogar zum Löten von Aluminium (!). Für den Infraschall und für den Ultraschall galt lange die Vorstellung, dass unser Gehör in diesen Frequenzbereichen absolut nichts mehr wahrnimmt. Dass dem nicht so ist, belegen neuere Erkenntnisse. Auch in der Messtechnik gibt es Unterschiede zum Hörfrequenzbereich. Im Ultraschallbereich kommt im Übrigen eine weitere physikalische Größe zum Tragen, von der man im Hörschallbereich nichts gemerkt hat, nämlich der Schallstrahlungsdruck. Daran erinnert man sich vielleicht beim Ultraschallsprudeln. Es handelt sich dabei um einen statischen Druck, der auch für das Auftreten des „Quarzwindes“ verantwortlich ist. **ELV**



Weitere Infos:

- [1] Veit, Ivar: „Flüssigkeitsschall“, Vogel-Verlag, Würzburg, 1979, ISBN: 3802301285
- [2] Veit, Ivar: „Technische Akustik“, Vogel-Verlag, Würzburg, 7. erweiterte Auflage, 2012, ISBN: 3834332828

ELV journal präsentiert:
Die ELV Lese-Offensive



**Kostenlose Fachbeiträge
zum Download**



Kennen Sie schon unsere ELVjournal Lese-Offensive? Im ELVjournal online finden Sie annähernd 100 kostenlose Fachbeiträge aus den Bereichen Maker, Neues vom Elektronik-Nachwuchs, Leser-Testberichte, Smart Home mit Homematic und Technik-Produkte.

Als reiner Print-Abonnent können Sie so testen, wie sich das ELVjournal online und damit jederzeit und überall lesen lässt. Wenn Sie das ELVjournal gerade kennengelernt haben, entdecken Sie hier die Themenvielfalt und stöbern unverbindlich in den Beiträgen aus der Welt der Technik.

Wir wünschen Ihnen auf jeden Fall viel Spaß mit dem ELVjournal – ob nun on- oder offline.

Starten Sie jetzt unter:

<https://de.elv.com/journal/service/kostenlose-fachbeitraege/> oder scannen Sie ganz einfach den QR-Code.



Maker

Raspberry Pi, Arduino,
3D-Drucker und
Elektronik-Themen

Spaß mit Elektronik

Neues vom
Elektronik-Nachwuchs

Leser testen

Spannende Berichte
von Lesern zu Produkten

Homematic

Hier dreht sich alles
um das Smart Home
mit Homematic

So funktioniert's

Interessante Beiträge zu
Technik-Produkten