

# Unterwasser-Navigationssystem für Gerätetaucher

Konzeptstudie von Norbert Köchli, seanus systems, Zürich

16. Juli 2004

## Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Unterwasser-Navigationssystem für Gerätetaucher basiert auf dem Prinzip moderner Sonargeräte. Dank der Verwendung neuester Technologien und der durchdachten Funktionsweise ist es aber schneller aufzusetzen und wesentlich einfacher anzuwenden. Das Ziel ist die Integration in einen Tauch- und Navigationscomputer, welcher alle beim Tauchen benötigten Instrumente in einem Gerät vereint. Die dadurch erzielten Vorteile gegenüber bestehenden Produkten machen dieses System sowohl für Berufs- wie auch für Sporttaucher interessant.

## Einführung

Mit der Erfindung der *Aqua-Lunge* durch Jacques Cousteau und Emile Gagnan und der seit da laufenden Verbesserung der Tauchausrüstung ist das Gerätetauchen einem breiten Publikum zu-



gänglich geworden. Heute gibt es Tausende von Tauchclubs und Hunderttausende von Sporttauchern auf der ganzen Welt. Während die einen davon warmes, klares Wasser mit Sichtweiten bis "zum Anschlag" vorziehen, gibt es andere, die selbst in einem eiskalten, trüben See nicht auf ihr Tauchvergnügen verzichten wollen. Die Mehrheit der Taucher liegt wahrscheinlich irgendwo dazwischen. Sie alle haben aber das Bedürfnis, sicher und heil wieder zum Ausgangspunkt des Tauchgangs

zurück zu finden. Das ist bei guten Sichtverhältnissen und in vertrauten Gewässern meistens auch kein Problem. Vielfach sind die Bedingungen aber nicht optimal, so dass zur Orientierung unter Wasser technische Hilfsmittel eingesetzt werden müssen.

Die heute zur Verfügung stehenden Ausrüstungsgegenstände erlauben dem Taucher einen längeren und sicheren Aufenthalt unter Wasser. Während bei der Tiefen- und Dekompressionsberechnung der Tauchcomputer wertvolle Dienste leistet, wird als Orientierungshilfe nach wie vor der altbewährte Magnetkompass eingesetzt. Dieser zeigt allerdings nur die Nordrichtung an, so dass zum genauen Navigieren viel Erfahrung und ein gutes Vorstellungsvermögen erforderlich sind.



Kommen erschwerte Bedingungen wie schlechte Sicht oder Strömungen hinzu, wird eine genaue Positionsbestimmung mit dem Kompass nahezu unmöglich. In einer solchen Situation bleibt selbst erfahrenen Tauchern vielfach nur der Aufstieg an die Oberfläche, um sich neu zu orientieren. Dieses nicht ungefährliche Manöver ist dann oft die einzige Möglichkeit, das gesuchte Ziel sicher zu finden.

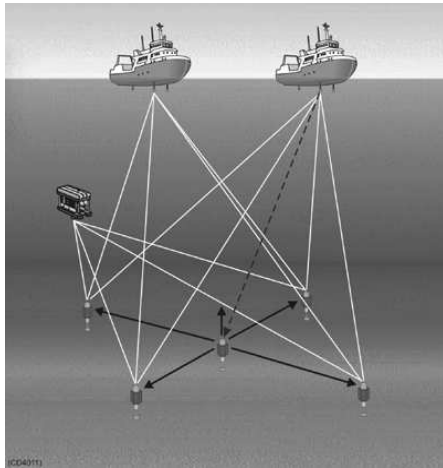
Helfen würden in solchen Fällen moderne Sonarsysteme, wie sie heute von kommerziellen und militärischen Organisationen eingesetzt werden. Diese erlauben sowohl die genaue Bestimmung der eigenen Position wie auch die Lokalisierung von Zielen unter Wasser. Wegen der hohen Komplexität und der daraus resultierenden Kosten kommen diese Systeme allerdings als Navigationshilfe für Sporttaucher kaum in Frage.

## Navigationssysteme

Die von der Seefahrt her bekannten elektronischen Navigationsverfahren wie *Loran* oder *Decca* sind für Unterwasseranwendungen nicht geeignet, da die verwendeten elektromagnetischen Funkwellen im Wasser zu stark gedämpft werden und deshalb schon in geringer Entfernung nicht mehr empfangen werden können. Auch Radar, Satelliten-Navigationssysteme (GPS - Global Positioning System) oder optische Verfahren können aus demselben Grund nicht in Betracht gezogen werden.



## Sonar

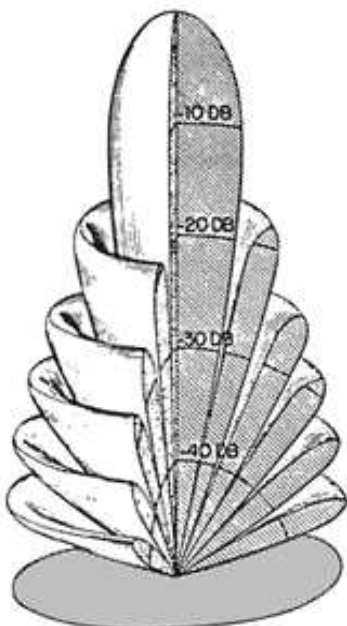


Anstelle elektromagnetischer Wellen werden für die Ortung und Navigation unter Wasser Schallwellen verwendet. Diese hydroakustischen Systeme werden unter dem Begriff *Sonar* (Sound Navigation and Ranging) zusammengefasst. Alle heute bekannten Unterwasser-Navigationssysteme arbeiten auf der Basis der Laufzeitmessung akustischer Signale. Für eine genaue Positionsbestimmung unter Wasser werden aufwendige Triangulationsverfahren mit mehreren geometrisch speziell angeordneten Sendern (Long Base Line) oder Empfängern (Short Base Line) angewendet. Moderne Systeme beruhen vielfach auf der Phasenmessung der eintreffenden Schallwellen (Ultra Short Base Line) oder aus einer Kombination dieser drei Verfahren.

## Ultraschall

Die in der Sonartechnik verwendeten Frequenzen liegen im Bereich von etwa 1...1000kHz. Frequenzen zwischen 8...45kHz werden vielfach in der professionellen Seefahrt benutzt. Für unsere Anwendung kommt der Ultraschallbereich von 50...250kHz in Betracht. Die Wahl der Frequenz ist immer ein Kompromiss. Bei tiefen Frequenzen werden wegen der kleineren Dämpfung im Wasser grössere Reichweiten erzielt. Höhere Frequenzen hingegen ergeben kleinere Schallwandler (Transducer). Ultraschallwellen breiten sich im Wasser als Longitudinalwellen aus. Es gelten die bekannten Gesetze der Akustik zur Reflexion, Brechung, Beugung und Absorption.

## Transducer

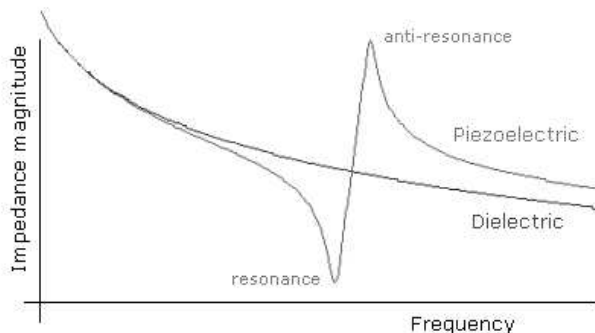


Ein Transducer ist ein elektroakustischer Wandler. Er konvertiert elektrische Energie in akustische oder umgekehrt. Der Schallsender (Transmitter) erzeugt dabei aus einer elektrischen Wechselspannung Schallwellen gleicher Phase und Frequenz. Diese Wellen werden vom Schallempfänger (Receiver) wieder in elektrische Signale umgewandelt. Bevorzugt werden piezoelektrische Keramikschringer aus *Bariumtitanat* oder *Bleizirkonattitanat* (PZT) eingesetzt. Je nach Frequenz und Bauform weisen Transducer eine mehr oder weniger starke Richtcharakteristik (Directivity) auf.

Das Verhältnis der Erregerfläche zur Wellenlänge bestimmt dabei den Öffnungswinkel (Beamwidth) der Hauptkeule (Main Lobe) und die Anzahl der Nebenkeulen (Side Lobes). Je kleiner der Öffnungswinkel, desto grösser die Schallkonzentration. Diese Bündelung der Schallenergie bewirkt bei der Entfernungsberechnung einen Gewinn, welcher als DI (Directivity Index) bezeichnet wird. Transducer mit einem Öffnungswinkel von  $360^\circ$  sind omnidirektional und ergeben daher einen DI von Null.

## Transmitter

Der Transmitter besteht aus der Steuerelektronik, der Speisung, dem Leistungsteil und einem oder mehreren piezokeramischen Elementen, deren Geometrie das Abstrahlverhalten und die Frequenz bestimmen. Die Ausnutzung des Piezoeffektes ist vom Wirkungsgrad her am besten, wenn die Wellenlänge in einer bestimmten Relation zur Dicke der Piezokeramik steht und dabei

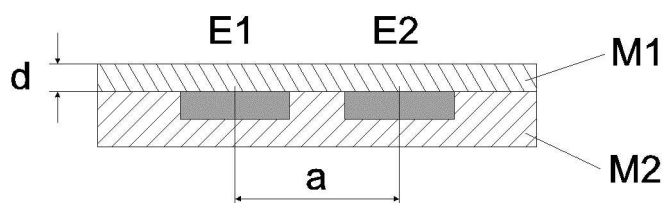


mechanische Resonanz auftritt. Der Leistungsteil muss neben der Hochspannungserzeugung durch Anpassung der Impedanz den optimalen Schwingungsmodus des Piezowandlers nutzen. Für den druckfesten Betrieb unter Wasser wird der Transmitter in ein Kunststoffrohr eingebaut und mit Kunstharz vergossen. Eine verlustfreie Ankopplung an das Wasser ist vom Material und der Dicke des so genannten akustischen Fensters abhängig.

Die wichtigsten Kenngrößen des Transmitters sind seine Abstrahlcharakteristik und der erzeugte Schalldruck (Sound Pressure). Dieser wird durch die zugeführte elektrische Leistung und den Gesamtwirkungsgrad bestimmt. Dabei ist besonders auf einen möglichst grossen Koppelfaktor des verwendeten Piezomaterials zu achten. Um Kavitation sicher zu vermeiden, sollte die akustische Leistung des Wandlers nicht mehr als etwa  $2\text{W}/\text{cm}^2$  betragen.

## Receiver

Im Receiver wandeln Piezokeramiken Schalldruckänderungen in entsprechende elektrische Signale um. Da hierbei die Keramik gegen ihre hohe Steifigkeit zusammengedrückt wird, erfolgt die Umsetzung praktisch ohne Weg. Eine grössere Spannungskonstante bewirkt dabei eine höhere Empfindlichkeit. Der beste Wirkungsgrad wird beim Betrieb in der Nähe der Antiresonanz erzielt. Die relativ kleinen Ausgangsspannungen müssen vor der Auswertung entsprechend aufbereitet werden. Das geschieht durch ein schmalbandiges Bandpassfilter und eine nachgeschaltete Verstärkerstufe.

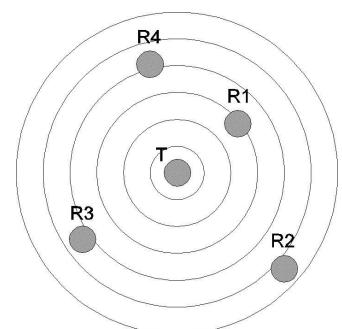


Die optimale Ankopplung zur Wasserseite erfolgt durch ein akustisches Fenster  $M1$  mit einer Dicke  $d$  von  $\lambda/4$  der zu empfangenden Ultraschallwellen. Die Richtung, aus der diese Wellen eintreffen, kann durch Messung der Phasenverschiebung zwischen

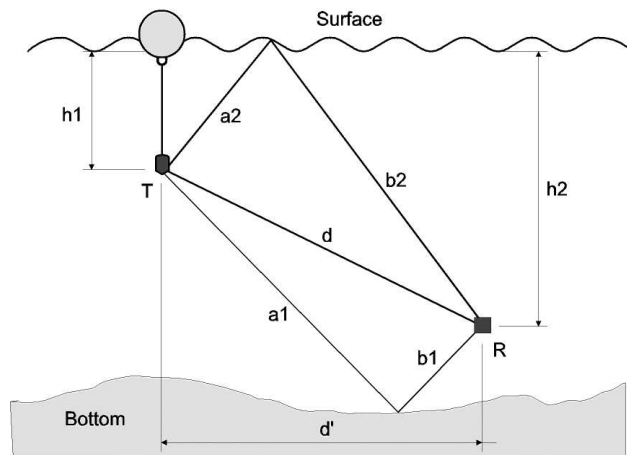
zwei identischen Piezoelementen  $E1$  und  $E2$ , welche im Abstand  $a$  einer Wellenlänge angeordnet sind, bestimmt werden. Die dem Wasser abgewandte Seite wird zur Störunterdrückung mit einem akustischen Sumpf  $M2$  versehen. Dazu eignen sich schalldämpfende Materialien wie Kork, Neopren oder Schaumgummi. Für den Receiver sind Empfindlichkeit (Sensitivity) und Richtcharakteristik die wichtigsten Kenngrößen. Diese werden, wie beim Transmitter, durch das Material und die Geometrie des Piezowandlers bestimmt.

## Prinzip

Unser einfaches und genaues Unterwasser-Navigationssystem beruht auf der Technik des Sonars. Es besteht aus einem Sender  $T$  und einem oder mehreren passiven Empfängern  $R$ . Das Wasser dazwischen dient als Medium für die sich kreisförmig ausbreitenden Ultraschallwellen. Dieser unidirektionale Ansatz hat den Vorteil, dass sowohl Sender wie auch Empfänger einfach und stromsparend ausgelegt werden können. Die Umsetzung dieses Prinzips erfordert allerdings die nachfolgenden konzeptionellen Überlegungen.



## Konzept

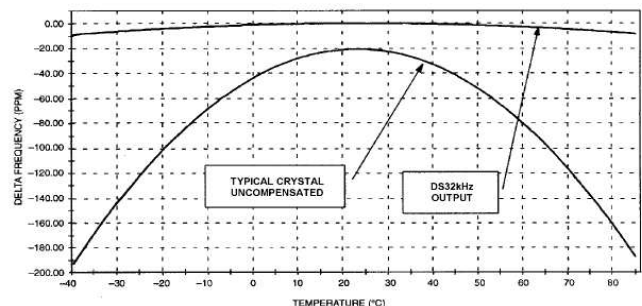


Ein unterhalb der Wasseroberfläche (Surface) platzierter Ultraschallsender  $T$  strahlt in festen Intervallen kurze akustische Impulsgruppen (Bursts) omnidirektional ins Wasser ab. Ein sich in Reichweite dieses Senders befindlicher Empfänger  $R$  kann anhand der Laufzeit des Signals und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser die Distanz  $d$  zum Sender berechnen. Aus  $d$ , der Sendertiefe  $h_1$  und der momentanen Tauchtiefe  $h_2$  lässt sich somit die für den Taucher relevante Entfernung  $d'$  ableiten und anzeigen.

Die Intensität und der Einfallswinkel der empfangenen Schallwellen geben Aufschluss über die Richtung zum Sender. Störend können sich allfällige Schallreflexionen an der Wasseroberfläche ( $a_2 + b_2$ ) und am Boden ( $a_1 + b_1$ ) auswirken. Diese lassen sich aber unterdrücken, solange die Burstlänge kürzer als  $a + b - d$  ist. Weiterhin können sich Umgebungsgeräusche durch Wellenbewegung oder Schiffsverkehr negativ auf das System auswirken. Die maximale Reichweite ist durch die Dämpfung des Signalpegels (Transmission Loss) infolge geometrischer Verluste und Absorption begrenzt. Das Sendeintervall muss grösser bemessen sein als die Signallaufzeit für diese Distanz. Um mehrere Sender im selben Tauchgebiet unterscheiden zu können, müssen die Bursts codiert werden. Das kann entweder über eine Auswahl verschiedener Sendefrequenzen oder durch geeignete Modulation des Signals erfolgen.

## Entfernungsmessung

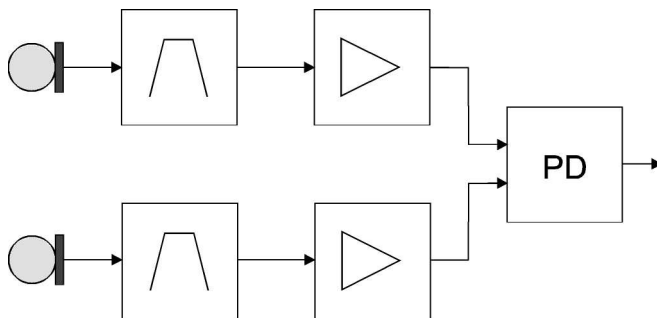
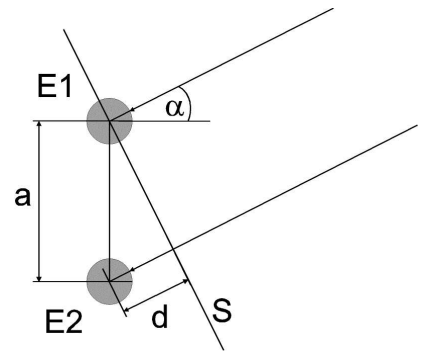
Damit der Empfänger die Entfernung bestimmen kann, muss er wissen, zu welchem Zeitpunkt der Sender den Burst abgestrahlt hat. Das setzt folgende zwei Bedingungen voraus: Erstens müssen sowohl Sender wie auch Empfänger über eine hochgenaue Zeitbasis verfügen und zweitens müssen diese im Gleichtakt laufen. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt rund 1500m/s. Daraus ergibt sich bei einer Gangabweichung der beiden Uhren von nur 1ms bereits ein Fehler von 1.5m. Mit heute verfügbaren Temperaturkompensierten Low-Power Quarzoszillatoren (TCXO) wird eine Genauigkeit von  $\pm 0.5\text{ppm}$  im Bereich von 10...30°C erreicht. Das würde bei einem Tauchgang von einer Stunde im schlechtesten Fall zu einem Distanzfehler von 5.4m führen. In der Praxis kann aber von einer eher kleineren Abweichung ausgegangen werden.



Weitere Anforderungen an die Zeitbasis hängen vom Einsatzradius und der geforderten Distanzauflösung ab. Bei einer maximalen Entfernung von 500m und einer Auflösung von 0.5m würde ein 10bit Zähler mit einer Taktrate von 3kHz ausreichen. Um die zweite Bedingung des Gleichtakts zu erfüllen, ist es unabdingbar, dass zu Beginn des Tauchgangs der Empfänger seine Zeitbasis mit derjenigen des Senders synchronisiert. Die gemessene Entfernung beträgt dann genau 0m. Eine weitere Fehlerquelle ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser. Sie ist nicht konstant, sondern abhängig von der Temperatur, dem Salzgehalt und dem Wasserdruck. Die Extremwerte können zwischen 1400...1560m/s liegen. Um diese Fehlerquelle sicher auszuschliessen, muss anhand der Druck- und Temperaturwerte ein Schallgeschwindigkeitsprofil erstellt werden. Anhand dieses Profils kann die durchschnittliche Schallgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger abgeleitet werden. Der Salzgehalt kann anhand der Leitfähigkeit des Wassers bestimmt werden. Dieser ist konstant und muss daher nicht laufend gemessen werden.

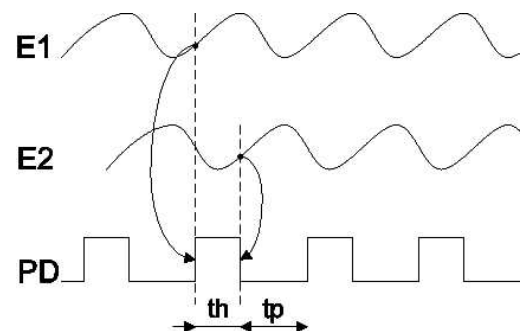
## Richtungsbestimmung

Um die Richtung zum Sender festzustellen, wird einerseits die Richtcharakteristik des Empfängers (Directivity) und andererseits der Winkel der eintreffenden Schallwellen herangezogen. Dazu dreht sich der Taucher langsam um seine Achse und macht anhand der Signalstärke eine erste grobe Peilung zum Sender. Sobald Ultraschallwellen empfangen werden, kann das Ultra Short Base Line-Verfahren angewendet werden. Dabei werden die eintreffenden Schallfronten  $S$  von den beiden Sensoren  $E1$  und  $E2$  aufgenommen. Ist ihr Abstand  $a$  viel kleiner als die Entfernung zum Sender, können die Signalwege als quasiparallel angenommen werden. Treffen die Schallwellen nicht frontal auf, entsteht ein Laufzeitunterschied  $d$  und eine daraus resultierende Phasenverschiebung  $\varphi$ . Anhand derer kann der Peilwinkel  $\alpha$  bestimmt werden. Ist der Abstand  $a$  gleich der Wellenlänge, bewirkt eine Abweichung  $\alpha$  von  $30^\circ$  bereits eine Phasenverschiebung  $\varphi$  von  $180^\circ$ . Mit dieser Methode kann ein Winkelbereich von  $\pm 90^\circ$  um die Peilachse abgedeckt werden. Um Mehrdeutigkeit auszuschliessen, darf der Wandlerabstand  $a$  nicht grösser als die Wellenlänge der verwendeten Ultraschallsignale sein. Der Öffnungswinkel der Wandler ist nicht kritisch - er kann im Bereich von  $60...180^\circ$  liegen.



Die von den beiden Schallwandlern abgegebenen elektrischen Signale werden von zwei nachgeschalteten, gleich aufgebauten Schaltungen verstärkt und von allen nicht interessierenden Frequenzanteilen befreit. Die so aufbereiteten Signale werden danach einem Phasendifferenzierer ( $PD$ ) zugeführt, welcher ein zur Phasenverschiebung proportionales Ausgangssignal liefert.

Da die Schallimpulse nach der Übertragung verzerrt sein können, wird jeweils nur der Nulldurchgang der steigenden Flanke ausgewertet. Das Duty Cycle  $th/tp$  des Ausgangssignals am  $PD$  gibt direkten Aufschluss über die Phasenverschiebung der beiden Signale  $E1$  und  $E2$  und somit auch über den gesuchten Peilwinkel zum Sender.  $E2$  wird gegenüber  $E1$  um  $180^\circ$  gedreht, um beim Übergang von  $-1^\circ$  nach  $+1^\circ$  einen Sprung des  $PD$  zu vermeiden. Das Duty Cycle ist dann in Peilrichtung genau 50%.



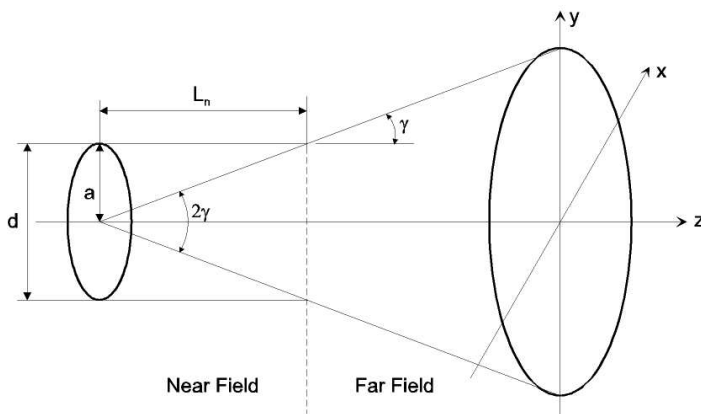
## Senderkennung

Sollen mehrere Sender im gleichen Tauchgebiet eingesetzt werden, kann es zu gegenseitigen Beeinflussungen kommen, welche eine sichere Positionsbestimmung gefährden. Damit ein Taucher auch bestimmt wieder zu "seinem" Sender zurück findet, muss er diesen von anderen unterscheiden können. Dazu wird das abgestrahlte Schallsignal so gekennzeichnet, dass die dazu gehörenden Empfänger es eindeutig identifizieren können. Eine Möglichkeit besteht darin, das Signal in der Frequenz oder in der Phase zu modulieren. Dies würde auch eine einfache, unidirektionale Datenübertragung für kurze Textmeldungen an die Taucher ermöglichen. Modulation bedeutet aber neben einem erhöhten technischen Aufwand auch eine unerwünschte Verlängerung der Burstdauer. Einfacher zu realisieren wäre eine Kanalwahl. Der Taucher stellt dabei vor der Synchronisation am Sender eine von vier Frequenzen ein. Die schmale Bandbreite piezokeramischer Elemente lässt aber nur geringe Variationen zu. Für einen 90kHz-Transducer könnten z.B. die Frequenzen 86.53, 89.04, 91.70 und 94.52kHz von einem  $1.6276\mu\text{s}$  Clock (614.4kHz) abgeleitet werden. Die Kanaltrennung im Empfänger erfolgt mit einem digitalen Bandpassfilter.

## Grundlagen

Die Akustik umfasst alle Erscheinungen, die mit der Erzeugung, Ausbreitung und dem Empfang von Schall im Zusammenhang stehen. Schall stellt sich als Druckwelle der verschiedensten Art dar, die sich in elastischen Medien wie Gas, Flüssigkeit und fester Körper ausbreitet. Die mit dem Schall verknüpfte Energie füllt einen Raum aus, der als Schallfeld bezeichnet wird. Schall entsteht infolge einer sich fortplanzenden mechanischen Verformung des Übertragungsmediums durch die physikalische Einwirkung einer Schallquelle. Die Schallfeldgrößen beschreiben die Eigenschaften des Schallfeldes.

## Schallfeldgrößen



Das von einem runden Schallwandler erzeugte Schallfeld unterteilt sich in Nah- und Fernfeld. Es ist bis zum Ende der Nahfeldzone zylinderförmig und weitet sich dann trichterförmig auf. Im Nahfeld eines Wändlers liegen durch Interferenzerscheinungen sehr komplizierte Druckverhältnisse vor. Diese entstehen durch Überlagerung der einzelnen Wellen der punktförmigen Elementarschwinger, aus denen sich die Gesamtwandlerfläche zusammensetzt (Huygens'sches Prinzip).

Die Nahfeldzone  $L_n$  ergibt sich aus dem Wandlerdurchmesser  $d$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\boxed{L_n = \frac{d^2}{4\lambda}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{L_n = \frac{a^2}{\lambda}} \quad (\text{b}) \qquad (1)$$

Im Fernfeld finden sich einfachere Verhältnisse vor. In Abhängigkeit vom Verhältnis  $d/\lambda$  werden die Schallwellen mit einem Öffnungswinkel von  $2\gamma$  gerichtet abgestrahlt und bewirken so eine Schallbündelung. Die Druckamplitude kann durch den Richtfaktor  $R$  angegeben werden:

$$\boxed{R = \frac{2J_1(ka \sin(\gamma))}{ka \sin(\gamma)}} \quad (2)$$

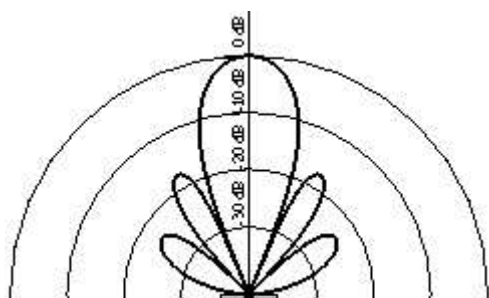
Dabei ist  $J_1$  die Bessel-Funktion erster Ordnung,  $\gamma$  der halbe Öffnungswinkel,  $a$  der Radius des Wändlers ( $d/2$ ) und  $k$  die Wellenzahl. Diese kann durch folgenden Term ausgedrückt werden:

$$\boxed{k = \frac{2\pi f}{c}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}} \quad (\text{b}) \qquad (3)$$

Die Frequenz  $f$ , die Schallgeschwindigkeit  $c$  und die Wellenlänge  $\lambda$  stehen im Zusammenhang:

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{f}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{f = \frac{c}{\lambda}} \quad (\text{b}) \qquad (4)$$

Durch die Nullstellen der Richtfaktorfunktion wird das Schallbündel in eine Haupt- und mehrere Nebenkeulen gegliedert. Der Hauptöffnungswinkel ist durch die erste Nullstelle bestimmt. Setzt man  $R = 0$ ,



ergibt die Lösung der Bessel-Funktion für den Term  $ka \sin(\gamma) = 3.83$ . Der -3dB-Öffnungswinkel berechnet sich für  $R = 0.708$  und ergibt 1.61374. Nebenstehende Abbildung zeigt ein Beam Pattern mit einem  $ka = 10$  und ergibt für  $\gamma = 22.5^\circ$ . Die weiteren Nullstellen sind bei 7.02 und 10.15 und legen die Nebenkeulen fest.

Wie man sieht, ist die Strahlungscharakteristik eines runden Schallwandlers durch die Grösse  $ka$  festgelegt. Der halbe Öffnungswinkel der Hauptkeule ergibt sich nach (2) zu:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{3.83}{ka}\right) \quad (5)$$

Setzt man für  $ka = 3.83$ , so ergibt sich ein  $\gamma$  von  $90^\circ$  und eine Beamwidth von  $180^\circ$ . Für grössere Werte von  $ka$  ergeben sich kleinere Öffnungswinkel. Die -3dB Beamwidth  $\beta$  ist demnach:

$$\beta = 2 * \arcsin\left(\frac{1.614}{ka}\right) \quad (6)$$

Diese Beziehungen gelten unabhängig vom Medium. Erst wenn man  $ka$  durch (3) ersetzt, zeigt sich der Zusammenhang mit dem Übertragungsmedium und der Wandlergeometrie:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{1.219\lambda}{d}\right) \quad (a) \quad \gamma = \arcsin\left(\frac{1.219c}{df}\right) \quad (b) \quad (7)$$

Wenn man  $ka$  in (6) ersetzt, wird der Zusammenhang zwischen dem  $d/\lambda$ -Verhältnis und der -3dB Beamwidth  $\beta$  des Schallwandlers deutlich:

$$\beta = 2 * \arcsin\left(\frac{0.514\lambda}{d}\right) \quad (a) \quad \beta = 2 * \arcsin\left(\frac{0.514c}{df}\right) \quad (b) \quad (8)$$

Aus (7) und (8) wird ersichtlich, dass das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Wandlerdurchmesser nicht beliebige Werte annehmen kann. Die Nahfeldlänge und der Öffnungswinkel eines Wandlers werden für ein bestimmtes Medium durch dieses Verhältnis bestimmt.

## Schallausbreitung

Schallwellen breiten sich mit endlicher Geschwindigkeit aus. Diese hängt hauptsächlich von der Dichte und der Temperatur des Mediums ab. Je dichter die Teilchen liegen, desto schneller kann der Schall übertragen werden. Folgende Gleichungen drücken die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des Schalls in Wasser in Abhängigkeit der Temperatur  $T = 0...35^\circ\text{C}$ , der Tiefe  $D = 0...1000\text{m}$  und des Salzgehaltes  $S = 0...45\text{ppt}$  in m/s aus:

$$c = 1449.2 + 4.623T - 0.0546T^2 + 1.391(S - 35) + 0.017D \quad (9)$$

Wilson (1960), max. Fehler 1.5%

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D \quad (10)$$

Medwin (1975), max. Fehler 0.5%

Die Ausbreitung von Schallwellen im Wasser verursacht Verluste an Schallenergie. Die abgestrahlte Schallintensität (Schallenergie pro Fläche) eines Wandlers nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab (Spreading Loss). Zusätzlich ist durch die Viskosität des Wassers eine frequenzabhängige Dämpfung (Absorption Loss) zu beobachten. Die Schallintensität  $I$  in  $\text{W}/\text{m}^2$  steht wie folgt im Verhältnis zum Schalldruck  $p$ :

$$I = \frac{p^2}{\sigma} \quad (a) \quad I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (b) \quad (11)$$

Das Produkt  $\rho c = \sigma$  entspricht der akustischen Impedanz des Übertragungsmediums. Setzt man für Meerwasser den Referenzdruck  $p = 1\mu\text{Pa}$  (RMS), die Dichte  $\rho = 1027\text{kg}/\text{m}^3$  und die Schallgeschwindigkeit  $c = 1490\text{m}/\text{s}$  ein, so ergibt sich die Referenzintensität  $I_l = 6.53 \cdot 10^{-19} \text{W}/\text{m}^2$ . Der Schallpegel  $SL$  (Source Level) eines Wandlers ist definiert als Verhältnis seiner Schallintensität  $I$  zur Referenzintensität  $I_l$  im Standardabstand von 1m und wird in dB re  $1\mu\text{Pa}$  angegeben.

Im Abstand von  $r = 1\text{m}$  um das akustische Zentrum einer omnidirektionalen Schallquelle beträgt die kugelförmige Oberfläche  $4\pi r^2 = 12.6\text{m}^2$ . Eine akustische Leistung von  $P_a$  Watt bewirkt damit in 1m Abstand eine Schallintensität von  $I = P_a / 12.6 \text{ W/m}^2$  und der Source Level  $SL$  wird:

$$\boxed{SL = 10 \log \left( \frac{I}{I_1} \right)} \quad (a) \qquad \boxed{SL = 10 \log \left( \frac{P_a / 12.6}{6.53 \cdot 10^{-19}} \right)} \quad (b) \qquad (12)$$

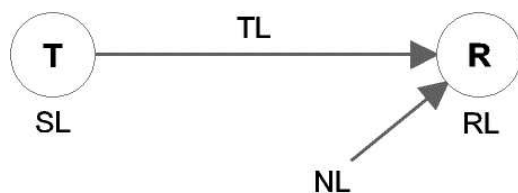
Wenn man (12b) weiter auflöst, vereinfacht sich der Ausdruck für  $SL$  und es wird deutlich, dass eine omnidirektionaler Wandler mit einem Schallpegel von 171dB re 1 $\mu$ Pa @ 1m eine Leistung  $P_a = 1\text{W}$  abstrahlt. Folglich entsprechen 161dB = 0.1W, 181dB = 10W und 191dB = 100W.

$$\boxed{SL = 10 \log(P_a) + 170.8\text{dB}} \quad (a) \qquad \boxed{SL = 10 \log(P_a) + 170.8\text{dB} + DI} \quad (b) \qquad (13)$$

Ist der Schallwandler nicht omnidirektional sondern gerichtet, bewirkt die Schallbündelung einen Gewinn  $DI$  (Directivity Index), welcher zum Source Level dazu addiert werden kann (13b). Der  $DI$  gibt das Intensitätsverhältnis eines direktionalen zu einem omnidirektionalen Wandler an:

$$\boxed{DI = 20 \log \left( \frac{d\pi}{\lambda} \right)} \quad (a) \qquad \boxed{DI = 10 \log \left( \frac{2.47}{\sin(\beta/2)^2} \right)} \quad (b) \qquad (14)$$

Obige Gleichungen drücken den  $DI$  anhand des  $d/\lambda$ -Verhältnis (14a) resp. der -3dB Beamwidth  $\beta$  (14b) des Schallwandlers aus.



Wie weiter oben erwähnt, wird die Ausbreitung von Schallwellen im Wasser gedämpft. Die Gesamtdämpfung, welche das Signal  $SL$  eines Transmitters  $T$  erfährt, wird als  $TL$  (Transmission Loss) bezeichnet. Um in einem Receiver  $R$  das Signal  $RL$  noch auswerten zu können, muss es über der Summe aller Störgeräusche

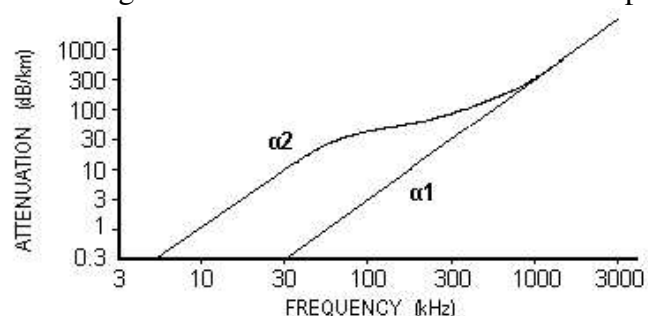
$NL$  (Noise Level) liegen. Dieser Signalpegel wird als Signal/Störabstand oder kurz  $SE$  (Signal Excess) bezeichnet und sollte mindestens 10dB betragen. Der  $SE$  wird durch die Sonargleichung wie folgt definiert:

$$\boxed{RL = SL + DI_T + DI_R - TL} \quad (a) \qquad \boxed{SE = RL - NL} \quad (b) \qquad (15)$$

Gut zu ersehen ist, dass sich sowohl der  $DI$  des Transmitters, wie auch der des Receivers positiv auf die gesamte Signalübertragung auswirken. In unserem Fall hat der Transmitter eine omnidirektionale Charakteristik, so dass für  $DI_T = 0$  eingesetzt werden muss.  $TL$  drückt die Relation der Referenzintensität  $I_1$  zur Schallintensität  $I_r$  im Abstand  $r = T-R$  aus.  $TL$  wird mit zunehmender Entfernung und zunehmender Frequenz grösser:

$$\boxed{TL = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_r} \right)} \quad (a) \qquad \boxed{TL = K \cdot \log(r) + \alpha r} \quad (b) \qquad (16)$$

Der Faktor  $K$  hängt von der Abstrahlcharakteristik des Schallwandlers ab. Für Zylinderwellen ist  $K = 10$  und für Kugelwellen  $K = 20$ . In der Praxis hat sich für einen omnidirektionalen Wandler ein  $K = 15$  gut bewährt. Der Term  $K \cdot \log(r)$  drückt die geometrischen Verluste aus. Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  wird in dB/km angegeben und ist abhängig von der Frequenz, der Temperatur und dem Salzgehalt des Wassers. Für Süßwasser ist  $\alpha = \alpha_1$ . Im Meer kommt unterhalb von 500kHz eine weitere Dämpfung  $\alpha_2$  hinzu, welche den gelösten Salzen (hauptsächlich  $\text{MgSO}_4$ ) im Wasser zuzuschreiben ist.





Die Absorptionskoeffizient  $\alpha_{kyd}$  in dB/kyd ist eine Funktion des Salzgehalts  $S$  in ppt, der Schallfrequenz  $f$  in kHz und der Relaxationsfrequenz  $f_T$  in kHz.

$$\alpha_{kyd} = A \frac{S \cdot f_T \cdot f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T} \quad (a) \quad \alpha_{km} = 1.094 \cdot \alpha_{kyd} \quad (b) \quad (17)$$

Schulkin & Marsh (1962), wobei  $A = 0.0186$  und  $B = 0.0268$ .

Die Umrechnung in dB/km erfolgt nach (17b). Die Relaxationsfrequenz  $f_T$  in kHz ergibt sich aus der Temperatur  $T$  in °C nach folgender Beziehung:

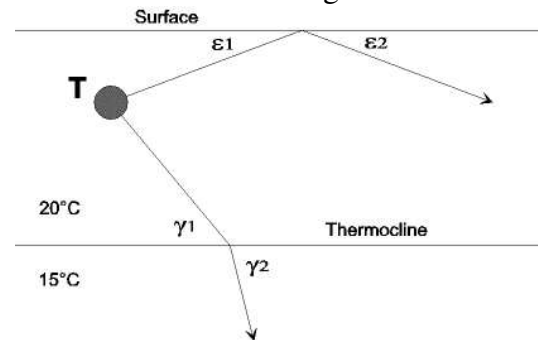
$$f_T = 21.9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)} \quad (a) \quad \alpha = \frac{79 f^2}{9500 + f^2} \quad (b) \quad (18)$$

Setzt man für  $S = 35$ ppt und  $T = 10^\circ\text{C}$  kann von  $f = 10 \dots 200$ kHz (18b) als gute Näherung dienen.

Folgende Tabelle zeigt gemessene Werte in dB/km für 4 Temperaturwerte  $T$  in °C und 10 Frequenzen  $f$  in kHz. Frequenzen dazwischen können linear interpoliert werden. Für die Berechnung des  $TL$  ist immer der grösste Wert in der Spalte zu verwenden.

$f$ [kHz] → ↓ $T$ [°C]	5	10	20	50	70	100	150	200	250	500
5	0.25	0.98	3.72	17.5	26.8	38.1	51.4	62.4	73.4	150.2
10	0.20	0.79	3.05	15.6	25.5	38.7	55.0	67.1	78.0	142.8
15	0.16	0.64	2.50	13.6	23.3	37.8	57.4	71.8	83.7	141.6
20	0.13	0.52	2.05	11.7	20.8	35.6	58.0	75.5	89.4	145.2

Die maximal mit einem direkten Schallstrahl erreichbare horizontale Entfernung heisst geometrische Reichweite. Infolge von Irregularitäten im Wasser kommt es zu zufälligen Abweichungen bei der Schallausbreitung. Neben Reflexion, Brechung und Streuung ist auch eine Beugung von



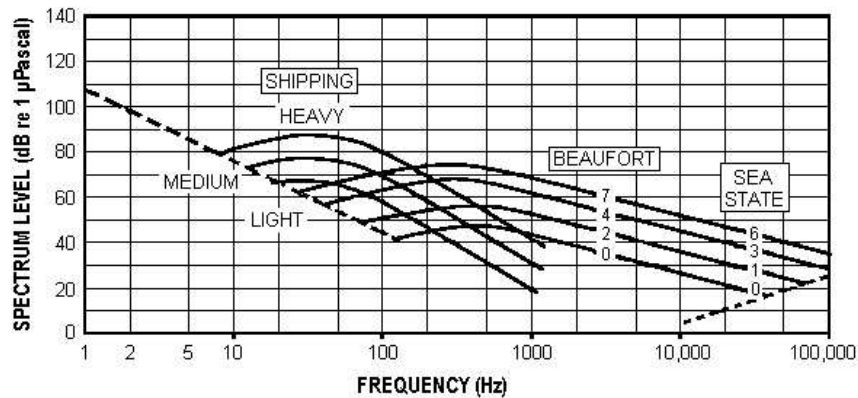
Schallstrahlen beim Übergang von einer thermischen Schicht zur anderen (Thermocline) zu beobachten. Durch die Temperatur- und damit verbundene Dichteänderung des Wassers erfolgt eine Änderung der Schallgeschwindigkeit, was eine Ablenkung des Schalls zur Folge hat. Snell's Gesetz (19a) beschreibt diesen Zusammenhang. Ab einem kritischen Winkel  $\gamma_1 = \arccos(c_1/c_2)$  wird der Strahl nicht mehr gebrochen, sondern an der Grenzschicht reflektiert. Reflexion tritt auch an Hindernissen, dem Grund und der Wasseroberfläche auf. Der Einfallswinkel  $\varepsilon_1$  ist in diesem Fall gleich dem Ausfallswinkel  $\varepsilon_2$ . Bei  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 90^\circ$  wird die Schallenergie vollständig zurück geworfen und kann dann als Echo registriert werden.

$$\frac{c_1}{\cos(\gamma_1)} = \frac{c_2}{\cos(\gamma_2)} \quad (a) \quad \gamma_2 = \arccos\left(\frac{c_2 \cos(\gamma_1)}{c_1}\right) \quad (b) \quad (19)$$

In obiger Abbildung ist ein Ultraschalltransmitter  $T$  in einer Wasserschicht von  $20^\circ\text{C}$  zu sehen. Ein von  $T$  emittierter Schallstrahl wird an der Thermocline zu einer tiefer liegenden Schicht von  $15^\circ\text{C}$  nach unten gebrochen. Da in der unteren Schicht die Schallgeschwindigkeit  $c_2$  wegen der tieferen Temperatur kleiner als  $c_1$  der oberen Schicht, wird dem zufolge  $\gamma_2$  grösser als  $\gamma_1$ .

Weitere nur sehr schwer berechenbare Effekte wie die Streuung reflektierter Schallwellen an der Oberfläche bei starkem Wellengang oder der Hall (Reverberation) durch kleine Inhomogenitäten wie Luftbläschen oder Bioorganismen sind für unsere Betrachtungen nicht von Bedeutung.

Als Störungen werden alle unerwünschten an den Empfängereingang gelangenden Schallsignale bezeichnet. Im Wasser ist das Umgebungsrauschen der grösste Störfaktor. Quellen dafür sind einerseits das Selbstrauschen der eigenen hydroakustischen Anlage und andererseits Störgeräusche durch Wellenbewegung, Regen, Schiffsverkehr sowie biologisches, thermisches und seismisches Rauschen. Selbstrauschen entsteht hauptsächlich durch vorbeiströmendes Wasser am Transducer. Da in unserem Fall die Eigenbewegung klein ist, kann diese Störquelle ausgeschlossen werden.



In der nebenstehenden Abbildung ist der Störeinfluss durch Schiffs- und Wellengeräusche zu sehen. Im Bereich 1...50kHz ist das Oberflächenrauschen durch Wellenbewegung dominant. Ab 30kHz steigt das thermische Rauschen mit 6dB/Oktave an. Diese Angaben beziehen sich auf eine Bandbreite von

1Hz und müssen nachher mit der -3dB-Bandbreite  $B$  des Wandlers verrechnet werden (22).

$$N_1 = 17 - 30 \log(f) \quad \text{(a) - Meeresturbulenzen 1...10Hz} \quad (20)$$

$$N_2 = 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log(f) - 60 \log(f + 0.03) \quad \text{(b) - Schiffsverkehr 10...500Hz}$$

$$N_3 = 50 + 7.5w^{1/2} + 20 \log(f) - 40 \log(f + 0.4) \quad \text{(c) - Oberflächenrauschen 500Hz...100kHz}$$

$$N_4 = 20 \log(f) - 15 \quad \text{(d) - Thermisches Rauschen ab 100kHz}$$

Wobei  $s$  den Schiffsverkehr von 0 (sehr leicht) bis 1 (sehr stark) und  $w$  die Windgeschwindigkeit in m/s ausdrücken. Ist für eine bestimmte Frequenz  $f$  in kHz mehr als eine Störquelle relevant, werden die einzelnen Rauschpegel  $N_1...N_4$  in dB re 1µPa/Hz mit der 'Power Summation' addiert:

$$NL = N_1 \oplus N_2 \oplus N_3 \oplus N_4 \quad \text{(a)} \quad NL = 10 \log \left( 10^{N_1/10} + 10^{N_2/10} + 10^{N_3/10} + 10^{N_4/10} \right) \quad \text{(b)} \quad (21)$$

Als Beispiel wird die Summe aller Störgeräusche bei 200Hz, starkem Schiffsverkehr und hohem Wellengang berechnet.  $N_2 = 70$ dB (Heavy Shipping) und  $N_3 = 76$ dB (Beaufort 7). Demnach ergibt sich für  $NL = 10 \log(10^{7.0} + 10^{7.6}) = 77$ dB. Bei 50kHz ist Schiffsärm nicht mehr störend und die Wellengeräusche haben nur noch einen  $N_3 = 42$ dB. Durch thermisches Rauschen kommt noch ein  $N_4 = 19$ dB dazu. Der Gesamtstörpegel wird somit  $NL = 10 \log(10^{4.2} + 10^{1.9}) = 42$ dB, die Thermikgeräusche fallen also mit 20dB nicht ins Gewicht. Der effektive Störpegel  $NL$  in dB re 1µPa bei der Frequenz  $f$  und einer Bandbreite  $B$  in Hz ist dann:

$$NL = NL(f) + 10 \log(B) \quad \text{(a)} \quad B = 1/t_b \quad \text{(b)} \quad (22)$$

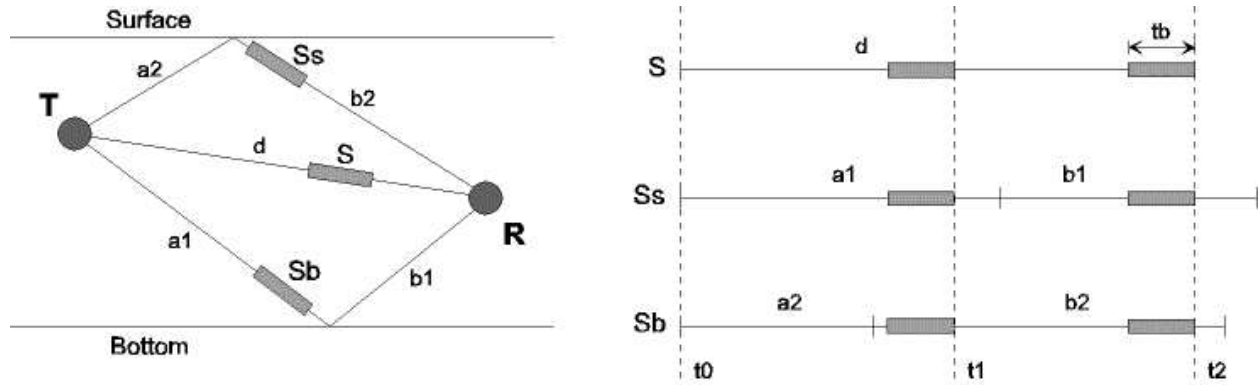
Die benötigte Bandbreite  $B$  ist durch die Burstdauer  $t_b$  bestimmt. Ein möglichst kurzer Burst erhöht die Unterscheidbarkeit zwischen direkten und reflektierten Signalen. Lange Bursts hingegen sind im Receiver sicherer zu detektieren. Der Signal/Störabstand  $SE$  muss grösser sein als der Detektionsschwellwert  $DT$  (Detection Threshold), um das empfangene Signal mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit  $DX$  (Detection Index) zu detektieren. Der  $DX$  gibt dabei das statistische Verhältnis zwischen sicher und falsch erkannten Signalen an. Für eine Detektionsrate von 99% und einer Fehlerrate von 1% kann ein praktikabler Wert für  $DX = 20$  eingesetzt werden.

$$DT = 10 \log \left( \frac{DX}{2t_b} \right) \quad \text{(a)} \quad t_b = \frac{l_b}{f} \quad \text{(b)} \quad (23)$$

Ein Beispiel für eine Signalfrequenz  $f = 50$ kHz und einer Burstlänge  $l_b = 32$  Perioden ergibt eine Burstdauer  $t_b = 640\mu s$  und einen Detektionsschwellwert  $DT = 42$ dB.

## Signalübertragung

Eines der grössten Hindernisse bei der akustischen Signalübertragung ist die Mehrfachsignalausbreitung (Multi Path Propagation) wegen Reflexionen am Boden und an der Wasseroberfläche. Überlagern sich das direkte mit reflektierten Signalen, kann es zu Fehlinterpretationen kommen.



In obiger Abbildung ist eine solche Situation schematisch dargestellt. Ein zum Zeitpunkt  $t_0$  vom Transmitter  $T$  ausgesendeter Burst  $S$  erreicht den Receiver  $R$  auf direktem Weg  $d$  (Direct Path). Da die Schallausbreitung omnidirektional erfolgt, wird das Signal irgend wann auch am Boden und an der Oberfläche auftreffen und dort reflektiert. In der linken Grafik sind diese Echos  $S_b$  (Bottom Path) und  $S_s$  (Surface Path) zum Zeitpunkt  $t_1$  zu sehen. Etwas später, zur Zeit  $t_2$ , ist das direkte Signal  $S$  vollständig im Receiver eingetroffen. Die Signale  $S_b$  und  $S_s$  müssen noch einen kurzen Weg zurücklegen, bis sie bei  $R$  angelangt sind. Eine Überlagerung findet nicht statt.

Befindet sich aber der Transmitter  $T$  oder der Receiver  $R$  nahe genug bei einer solchen reflektierenden Schicht, besteht die Gefahr, dass das Direktsignal  $S$  überlagert wird und somit nicht mehr richtig ausgewertet werden kann. Das bedeutet, dass sowohl  $T$  wie auch  $R$  einen gewissen Minimalabstand  $m$  zu allen möglichen Schallreflektoren einhalten müssen, um einen sicheren Empfang im Receiver zu gewährleisten:

$$\boxed{m = c \cdot t_b} \quad (a) \qquad \boxed{m > a + b - d} \quad (b) \qquad (24)$$

Dabei entsprechen  $t_b$  der Burstdauer in s und  $c$  der Schallgeschwindigkeit im Wasser in m/s. Somit kann dem geschilderten Problem durch geeignete Positionierung von  $T$  und  $R$  und einer möglichst kurzen Burstdauer entgegen gewirkt werden. Aus (23a) ist zu ersehen, dass für eine genügend gute Signaldetektion eine lange Burstdauer vorteilhafter wäre. Hier wird im Design ein Kompromiss notwendig sein. Weiterhin trägt der  $DI_R$  des Receivers durch die Richtfunktion zur Verbesserung bei. Der Transmitter kann durch eine entsprechende Konstruktion zumindest die Oberflächenreflexionen verhindern, indem er nur nach unten, also halbkugelförmig, abstrahlt.

Echos haben immer einen kleineren Signalpegel als das Direktsignal. Erstens erfahren sie durch den längeren Weg eine grössere Dämpfung im Wasser und zweitens wird je nach Beschaffenheit des Bodens ein Teil der Schallenergie absorbiert. Fels reflektiert ca. 90%, schlammiger Boden nur noch etwa 20%. Nach Empfang und Decodierung des Nutzsignals muss der Receiver alle nachfolgenden Signale für eine gewisse Zeit ignorieren. Diese Zeit sollte länger als die Laufzeit des entferntesten Echos sein - oder zumindest so lang, bis der Echopegel unter den  $DT$  sinkt und nicht mehr detektiert werden kann. Die Repetitionszeit  $t_r$  sollte mindestens doppelt so lang sein wie die Signallaufzeit für den geforderten Einsatzradius. Das gesamte Timing wird durch einen Distanzzähler mit  $z$  Bit Breite und einer Taktrate der Frequenz  $f_c$  bestimmt. Dadurch sind die Distanzauflösung  $d_{min}$  und die Maximalreichweite  $d_{max}$  wie folgt festgelegt:

$$\boxed{d_{min} = \frac{c}{f_c}} \quad (a) \qquad \boxed{d_{max} = t_r \cdot c = \frac{2^z \cdot c}{f_c}} \quad (b) \qquad (25)$$

Ein 16bit Zähler mit einer Taktfrequenz  $f_c = 40\text{kHz}$  hat eine Repetitionszeit  $t_r = 1.6\text{s}$ , eine maximale Reichweite  $d_{max} = 2457\text{m}$  und eine Auflösung  $d_{min} = 3.75\text{cm}$ .

Das Konzept der Entfernungsmessung fordert im Transmitter und im Receiver zwei hochgenaue und synchron laufende Oszillatoren. Der im schlechtesten Fall zu erwartende Distanzfehler  $d_e$  ist von der Gangabweichung  $a$  dieser Taktgeber abhängig und kumuliert sich über die Tauchzeit  $t$ :

$$\boxed{d_e = a \cdot c \cdot t} \quad (a) \qquad \boxed{a = |\pm a_T| + |\pm a_R|} \quad (b) \qquad (26)$$

Für die Gangabweichung  $a_T$  des Transmitters und  $a_R$  des Receivers ist der Betrag der Frequenzstabilität zur Temperatur ( $\Delta f/T$ ) einzusetzen. Sind z.B.  $a_T = \pm 0.5\text{ppm}$  und  $a_R = \pm 1.0\text{ppm}$  dann ist  $a = 1.5\text{ppm}$  und der maximale Distanzfehler  $d_e = 8.1\text{m}$  pro Stunde.

Die Synchronisierung erfolgt zu Beginn des Tauchgangs auf der Sendertiefe  $H$  in einem Abstand grösser als die Nahfeldlänge. Der Empfang eines Bursts setzt den Distanzzähler  $z = 0$  (reset). Mit grösser werdender Entfernung  $d$  zum Transmitter braucht das Signal immer länger bis zum Receiver. Wenn es dort eingetroffen ist, wird der aktuelle Zählerstand  $z$  ausgelesen. Dieser Wert entspricht der Signallaufzeit, welche dann mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  verrechnet wird:

$$\boxed{d = z \cdot d_{\min} = \frac{z \cdot c}{f_c}} \quad (a) \qquad \boxed{d_h = \sqrt{d^2 - (D - H)^2}} \quad (b) \qquad (27)$$

Die Horizontaldistanz  $d_h$  ergibt sich nun aus der Entfernung  $d$  und der Tauchtiefe  $D$ .

Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  ist für die Distanzberechnung von grosser Bedeutung. Wie aus (10) ersichtlich ist, wird diese von mehreren Faktoren beeinflusst. Die Temperatur  $T$  und die Tiefe  $D$  werden für die Dekompressionsberechnungen benötigt und müssen mit entsprechenden Sensoren erfasst werden. Der Salzgehalt  $S$  in ppt kann über die Leitfähigkeit  $C$  in S/m und die Temperatur  $T$  in °C des Wassers ermittelt werden:

$$\boxed{S = -0.505 + 11.15294C + 0.3680067C^2 - 0.35412CT - 0.0120291TC^2 + 0.0086CT^2 + 0.0000048C^2T^3 - 0.00011CT^3} \quad (28)$$

Die Leitfähigkeit  $C$  ist materialspezifisch und lässt sich aus dem Leitwert  $G$  in S durch Messung des Stroms  $I$  und der Spannung  $U$  sowie der Elektrodenfläche  $A$  und -abstand  $l$  ermitteln:

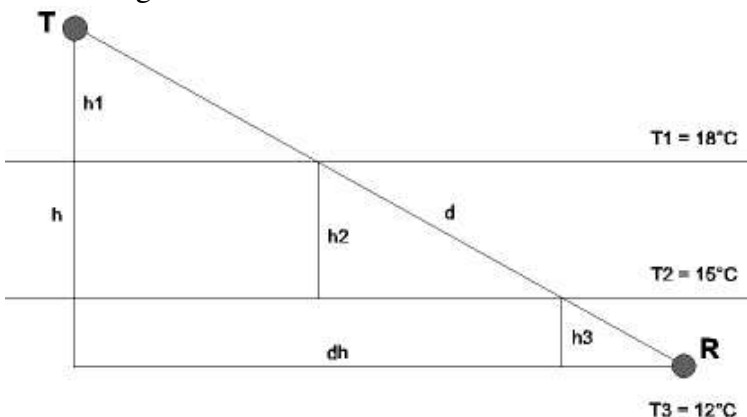
$$\boxed{G = \frac{I}{U} = \frac{C \cdot A}{l}} \quad (a) \qquad \boxed{C = \frac{I \cdot l}{U \cdot A} = \frac{G \cdot l}{A} = K \cdot G} \quad (b) \qquad (29)$$

Die Grösse  $l/A$  wird als Zellkonstante  $K$  bezeichnet. Zur Vermeidung von Polarisierungseffekten muss die Messung mit Wechselstrom von etwa 100Hz...5kHz erfolgen.

Eine genaue Messung all dieser physikalischen Grössen ist sehr wichtig. Der Einfluss auf  $c$  ist:

$T$ - Temperatur	-4.6m/s pro °C
$D$ - Tiefe	-0.016m/s pro m
$S$ - Salzgehalt	-1.34m/s pro ppt

Das bedeutet, dass für eine präzise Distanzberechnung die Schallgeschwindigkeit  $c$  nicht als konstant angenommen werden darf. Vielmehr muss diese über das Tauchprofil gemittelt werden.



Nebstehende Abbildung zeigt einen Schallstrahl vom Transmitter  $T$  zum Receiver  $R$  (Beugung und Strömung vernachlässigt). Während seiner Ausbreitung  $d$  legt er dabei einen Tiefenunterschied  $h$  zurück und durchquert drei verschiedene Temperaturschichten. Die Schichtdicken  $h_1$ ,  $h_2$  und  $h_3$  und -temperaturen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  werden in regelmässigen Abständen gemessen und gespeichert.

Für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit werden nun nicht die aktuelle Tiefe  $D$  und Temperatur  $T$ , sondern die gemittelten Werte  $D_a$  und  $T_a$  eingesetzt. Diese ergeben sich durch Mittelwertbildung der gespeicherten Temperatur- und Schichtdickenwerte:

$$\boxed{D_a = D - \frac{h}{2} = \frac{D + H}{2}} \quad (a) \qquad \boxed{T_a = \frac{h_1 \cdot T_1 + h_2 \cdot T_2 \dots h_n \cdot T_n}{h}} \quad (b) \quad (30)$$

Hierbei bedeutet  $H$  die Tiefe des Transmitters unterhalb der Wasseroberfläche. Der Salzgehalt  $S$  ist über den gesamten Tiefenbereich ziemlich konstant. Es reicht daher, diesen nur einmal oder in grossen Intervallen zu messen.

Die Tiefe  $D$  errechnet sich aus der Dichte  $\rho$  und dem hydrostatischen Druck  $P_h$ . Dieser entspricht dem gemessenen Umgebungsdruck  $P_a$  abzüglich des Luftdrucks  $P_b$  (in Pa = N/m<sup>2</sup>). Die Erdbeschleunigung  $g = 9.81\text{m/s}^2$  kann als konstant angenommen werden (Gravitationskonstante):

$$\boxed{D = \frac{P_h}{g\rho} = \frac{P_a - P_b}{g\rho}} \quad (a) \qquad \boxed{\rho = 1027 - 0.15(T - 10) + 0.78(S - 35)} \quad (b) \quad (31)$$

Die Dichte  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup> ergibt sich aus der Temperatur  $T$  und dem Salzgehalt  $S$  des Wassers. Die Tiefenmessung nach EN/DIN 13319 legt für einen Druck  $P_h = 1\text{bar}$  eine Tiefe  $D = 10\text{m}$  fest. Das stimmt aber nur bei einer Dichte  $\rho = 1019.7\text{kg/m}^3$  genau. Der dadurch entstehende Fehler ist:

Süsswasser ( $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ) 102% der Anzeige

Salzwasser ( $\rho = 1027\text{kg/m}^3$ ) 99% der Anzeige

Die Richtung zum Transmitter wird mit zwei in einer Ebene liegenden Schallwandler im Abstand  $a$  durch Phasenmessung der eintreffenden Schallfronten bestimmt. Anhand des Laufzeitunterschieds entsteht eine Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen den beiden Signalpfaden. Der gesuchte Einfallswinkel  $\alpha$  des Signals in  $^\circ$  ergibt sich dann anhand der Wellenlänge  $\lambda$  wie folgt:

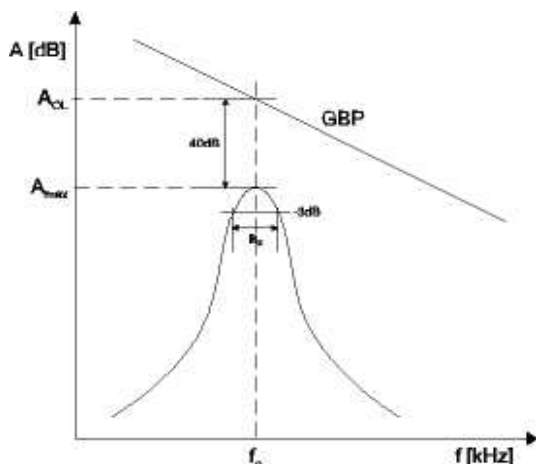
$$\boxed{\alpha = \arcsin\left(\frac{\varphi\lambda}{360a}\right)} \quad (a) \qquad \boxed{\alpha_{\max} = \pm \arcsin\left(\frac{\lambda}{a}\right)} \quad (b) \quad (32)$$

Die maximale Auslenkung ohne Mehrdeutigkeit  $\alpha_{\max} = \pm 90^\circ$  ergibt sich bei  $a = \lambda$ , also wenn der Wandlerabstand genau einer Wellenlänge entspricht. Signale von hinten können so nicht detektiert werden. Dazu muss vorab eine Grobpeilung anhand der Signalstärke vorgenommen werden.

Damit möglichst wenig Störgeräusche in den Receiver gelangen, werden am Ausgang der beiden Wandler zwei identische aktive Bandpassfilter nachgeschaltet. Die Mittenfrequenz entspricht der Signalfrequenz  $f_o$ . Die Steilheit sollte mindestens -12dB/Oktave betragen. Die optimale -3dB-Bandbreite  $B_F$  errechnet sich wie die Wandlerbandbreite nach (22b) anhand der Burstdauer  $t_b$ :

$$\boxed{B_F = 1.37/t_b} \quad (a) \qquad \boxed{SR = \pi \cdot V_{cc} \cdot f_o} \quad (b) \quad (33)$$

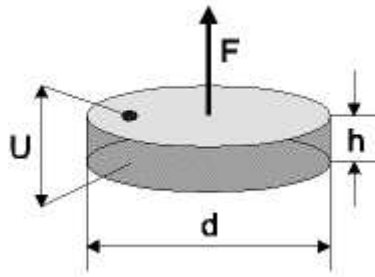
Die Anforderungen an den verwendeten Operationsverstärker sind hoch. Er muss stromsparend, rauscharm und schnell sein. Die minimale Anstiegsgeschwindigkeit  $SR$  (Slew Rate) wird durch



die Signalfrequenz  $f_o$  und die Betriebsspannung  $V_{cc}$  gemäss (33b) bestimmt. Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt  $GBP$  (Gain Bandwidth Product) bei der Mittenfrequenz  $A_{OL}$  (Open Loop Gain) sollte mindestens 40dB über der Verstärkung  $A_{\max}$  liegen. Bei  $f_o = 40\text{kHz}$  und  $V_{cc} = 5\text{V}$  ergibt sich  $SR = 0.63\text{V}/\mu\text{s}$ . Der LM6134 mit  $8\text{V}/\mu\text{s}$  soll als Beispiel dienen. Das  $GBP = 10\text{MHz}$  ergibt ein  $A_{OL} = GBP/f_o = 250 = 48\text{dB}$ . Mit einem Sicherheitsabstand von 40dB wird  $A_{\max} = 8\text{dB}$ . Die Verstärkung des Filters kann in diesem Fall höchstens 8dB oder Faktor 2.5 betragen. Alle Widerstände sollten 1% und die Kondensatoren 2% (max. 5%) Toleranz haben.

## Piezowandler

Die am häufigsten verwendeten Schallwandler für Unterwasseranwendungen sind piezokeramische Schwinger. Piezoelektrische Keramiken sind spezielle Ferroelektrika, welche durch Polung in einem starken elektrischen Feld und bei hoher Temperatur ihre piezoelektrischen Eigenschaften erhalten haben. Die Piezoelektrizität beschreibt die Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Grössen. Das Anlegen einer elektrischen Spannung  $U$  bewirkt in Polarisationsrichtung eine mechanische Veränderung der Wandlerdicke  $h$  und eine daraus resultierende Kraft  $F$  auf das umgebende Medium. Umgekehrt wird durch Druck auf die Piezooberfläche eine elektrische Ladung  $Q$  induziert, welche als Spannung  $U$  abgegriffen werden kann. Die schnellen Druckänderungen, welche Ultraschallwellen auf die Piezokeramik ausüben, erzeugen eine Wechselspannung mit derselben Frequenz. Die Grösse dieser Spannung  $U$  ist vom Schalldruck  $F$ , der Wandlerlänge  $h$  und -oberfläche  $A$ , sowie der Spannungskonstante  $g_{33}$  abhängig:



Die Piezoelektrizität beschreibt die Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Grössen. Das Anlegen einer elektrischen Spannung  $U$  bewirkt in Polarisationsrichtung eine mechanische Veränderung der Wandlerdicke  $h$  und eine daraus resultierende Kraft  $F$  auf das umgebende Medium. Umgekehrt wird durch Druck auf die Piezooberfläche eine elektrische Ladung  $Q$  induziert, welche als Spannung  $U$  abgegriffen werden kann. Die schnellen Druckänderungen, welche Ultraschallwellen auf die Piezokeramik ausüben, erzeugen eine Wechselspannung mit derselben Frequenz. Die Grösse dieser Spannung  $U$  ist vom Schalldruck  $F$ , der Wandlerlänge  $h$  und -oberfläche  $A$ , sowie der Spannungskonstante  $g_{33}$  abhängig:

auf die Piezokeramik ausüben, erzeugen eine Wechselspannung mit derselben Frequenz. Die Grösse dieser Spannung  $U$  ist vom Schalldruck  $F$ , der Wandlerlänge  $h$  und -oberfläche  $A$ , sowie der Spannungskonstante  $g_{33}$  abhängig:

$$Q = d_{33} \cdot F \quad (a)$$

$$U = \frac{g_{33} \cdot F \cdot h}{A} = \frac{4 \cdot g_{33} \cdot F \cdot h}{d^2 \cdot \pi} \quad (b) \quad (34)$$

Die Spannungskonstante  $g_{33}$  in Vm/N wie auch die Ladungskonstante  $d_{33}$  in C/N sind material-spezifische Grössen, welche aus dem Datenblatt des Piezoherstellers zu entnehmen sind.

Der tiefgestellte Doppelindex 33 bei den Materialkonstanten kennzeichnet die Verknüpfung von elektrischen und mechanischen Grössen in einem standardisierten, kartesischen Koordinatensystem. Die Ziffern 1, 2 und 3 indizieren dabei die X, Y und Z-Koordinate. Die erste Zahl gibt die Richtung der Erregung vor, die Zweite die der Reaktion darauf. Die 3- respektiv Z-Richtung entspricht dabei definitionsgemäss der Polarisationsrichtung.

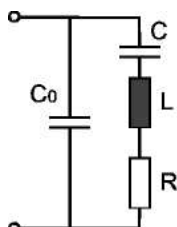
Praktische Bedeutung hat ebenso der dimensionslose Koppelfaktor  $k$ , der den direkten Vergleich verschiedener Materialien zulässt. Er beschreibt die Fähigkeit einer Piezokeramik, elektrische Energie in mechanische - und umgekehrt - umzuwandeln. Er ist nicht identisch mit der Effizienz eines Piezowandlers, dennoch bewirkt ein grösserer Koppelfaktor auch eine bessere Effizienz.

$$k = \sqrt{\frac{E_{\text{Mechanical}}}{E_{\text{Electrical}}}} \quad (a)$$

$$f_r = \frac{N_3}{h} \quad (b) \quad (35)$$

Bei einem Axial- oder Dickenschwinger steht die Resonanzfrequenz  $f_r$  in Relation zur Dicke  $h$  der Piezoscheibe. Die Frequenzkonstante  $N_3$  in m/s entspricht der halben Schallgeschwindigkeit in der durch den Index bezeichneten Schwingungsrichtung. Sie bestimmt nicht nur die Grundfrequenz, sondern auch die ganzzahligen Oberwellen. Ein Piezoelement aus Bleizirkonattitanat hat ein  $N_3 = 2000\text{m/s}$ . Bei einer Dicke  $h = 10\text{mm}$  ergibt sich daraus die Resonanz bei  $f_r = 200\text{kHz}$ . Setzt man diese Werte in Gleichung (4a) ein, wird ersichtlich, dass die Dicke  $h = \lambda/2$  entspricht und dabei mechanische Resonanz auftritt. Die Frequenzkonstante  $N$  wird je nach Hersteller auch in Hz/m oder kHz/mm angegeben, was der Einheit m/s entspricht.

Piezokeramische Wandler werden normalerweise in einem bestimmten Schwingungsmodus bei der spezifizierten Resonanzfrequenz betrieben. Je nach Geometrie des Schwingers können aber mehrere Moden gleichzeitig vorkommen. Vor allem wenn die Dicke  $h$  und der Durchmesser  $d$  ähnliche Dimensionen haben, können Schwingungen im Axial- und Radialmodus auftreten.



Nebenstehende Abbildung zeigt das elektrische Ersatzschaltbild eines piezokeramischen Schwingers. In diesem Modell repräsentiert  $R$  den Energietransfer ins Wasser und die mechanischen Verluste. Bei Serienresonanz heben sich der kapazitive Blindwiderstand  $X_C$  von  $C$  und der induktive Blindwiderstand  $X_L$  von  $L$  auf und die Impedanz  $|Z| = R$  wird minimal. Die optimale Arbeitsfrequenz für einen Transmitter ist daher bei der Serienresonanzfrequenz  $f_r$ .

Der Parallelkondensator  $C_0$  stellt die dielektrische Kapazität des Piezoelements dar. Bei Parallelresonanz ist der Kreis  $C_0$ ,  $C$  und  $L$  in Resonanz. Der Schwingkreis wird hochohmig und die Impedanz  $|Z|$  erreicht ein Maximum. Dies ist bei der Antiresonanzfrequenz  $f_a$  der Fall, welche immer oberhalb der Resonanzfrequenz  $f_r$  liegt. Bei der Parallelresonanzfrequenz  $f_a$  ist der Wandler am effizientesten als Receiver. Die Gesamtkapazität  $C_0$  und damit auch die Frequenz  $f_a$  werden stark durch externe Einflüsse wie Kabelkapazitäten und Material des akustischen Fensters beeinflusst. Die Resonanzfrequenzen berechnen sich folgendermassen:

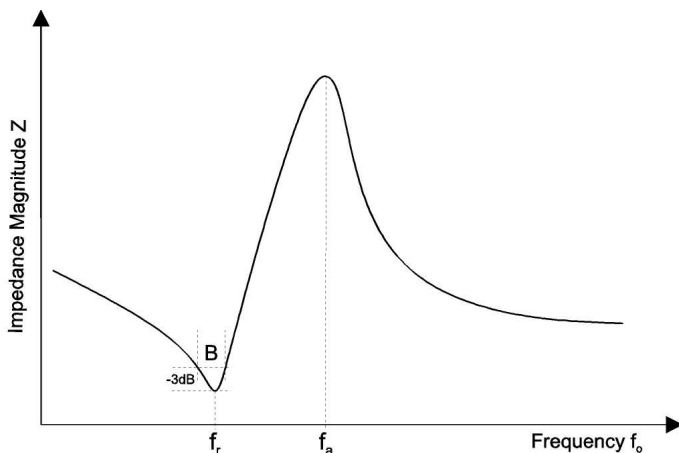
$$\boxed{f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{f_a = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C + C_0}{L \cdot C \cdot C_0}}} \quad (\text{b}) \quad (36)$$

Die Werte von  $C$  und  $L$  in diesem Modell sind stark frequenzabhängig. Es hat daher nur bei einer bestimmten Frequenz Gültigkeit. In unserem Fall ist das die optimale Signalfrequenz des Unterwasser-Navigationssystems. Die weiteren Betrachtungen beziehen sich auf diese Frequenz  $f_o$ .

In Serienresonanz wenn  $f_o = f_r$  ist die gesamte Energie des Piezowandlers in den beiden Kondensatoren gespeichert.  $C$  entspricht dabei der mechanischen und  $C_0$  der elektrischen Energie. In dieser Situation kann der effektive Koppelfaktor  $k_{eff}$  folgendermassen ausgedrückt werden:

$$\boxed{k_{eff} = \sqrt{\frac{C}{C + C_0}}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}}} \quad (\text{b}) \quad (37)$$

Löst man die obigen Gleichungen weiter auf, kann der effektive Koppelfaktor  $k_{eff}$  aus den beiden Resonanzfrequenzen  $f_r$  und  $f_a$  bestimmt werden. Er ist immer tiefer als die theoretischen Werte für  $k$  aus dem Datenblatt. Bei einem Verhältnis  $(f_a - f_r) / f_r = 0.15$  ergibt sich ein  $k_{eff} = 0.5$  und ein  $k_{33} = 0.54$ . Bei 0.25 steigen dieselben Koppelfaktoren auf 0.6 und 0.64 an.



Die Bandbreite  $B$  eines piezokeramischen Wandlers ist sehr schmal. Sie ist definiert als Differenz der beiden -3dB-Frequenzen um die Resonanzfrequenz  $f_r$ . Die Güte  $Q_m$  drückt nun das Verhältnis dieser Frequenzen aus. Wandler mit einer grösseren Güte haben eine schmalere Bandbreite und damit eine grössere Tendenz zum nachhallen beim Senden. Nebenstehende Abbildung verdeutlicht den Verlauf der Impedanz  $|Z|$  zur Frequenz  $f_o$  und zeigt die Bandbreite  $B$  eines Wandlers bei Serienresonanz um  $f_r$ .

Die obere -3dB-Frequenz wird mit  $f_H$  und die untere mit  $f_L$  bezeichnet:

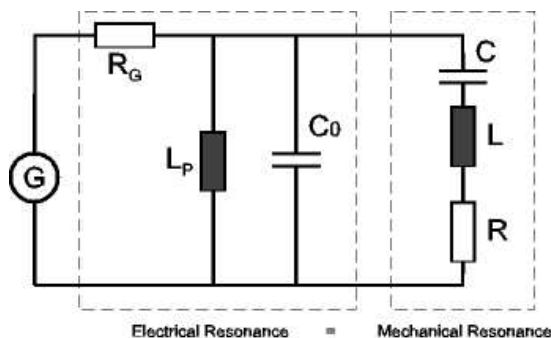
$$\boxed{Q_m = \frac{f_r}{f_H - f_L} = \frac{f_r}{B}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{Q_e = \frac{1}{\tan \delta}} \quad (\text{b}) \quad (38)$$

Die mechanische Güte  $Q_m$  und der dielektrische Verlustfaktor  $\tan \delta$  werden in den Datenblätter der verschiedenen Piezomaterialien angegeben. Die elektrische Güte  $Q_e$  ist der Kehrwert der dielektrischen Verluste durch  $C_0$ . Der elektroakustische Wirkungsgrad  $n$  drückt das Verhältnis der abgestrahlten akustischen Leistung  $P_a$  zur zugeführten elektrischen Leistung  $P_e$ :

$$\boxed{n = \frac{P_a}{P_e}} \quad (\text{a}) \qquad \boxed{n = \frac{k^2}{k^2 + 1/(Q_m \cdot Q_e)}} \quad (\text{b}) \quad (39)$$

Der Wirkungsgrad

Die Parallelkapazität  $C_0$  eines Piezowandlers wirkt sich negativ auf die angrenzende Elektronik aus. Im Transmitter muss die Leistungsstufe mehr Strom liefern und im Receiver wird das Nutzsinal kapazitiv belastet und damit abgeschwächt. Diesem Effekt kann durch eine parallel geschaltete Induktivität  $L_p$  entgegengewirkt werden. Das wird als Abstimmung (Tuning) oder Anpassung (Matching) bezeichnet. Untenstehende Abbildung zeigt das erweiterte Ersatzschaltbild.



Bei optimaler Parallelabstimmung entstehen zwei gekoppelte Schwingkreise, ein elektrischer und ein mechanischer, welche beide bei  $f_r$  in Resonanz sind.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Impedanz eines Wandlers von der akustischen Impedanz des umgebenden Mediums beeinflusst wird. Das bedeutet, dass diese an der Luft und im Wasser andere Werte aufweist. Daher müssen alle Messungen am Wandler im Wasser durchgeführt werden!

Mit solchen einfachen Messungen lassen sich die minimale Impedanz  $Z_{min}$  und Frequenz  $f_r$  bei Serienresonanz und die maximale Impedanz  $Z_{max}$  und Frequenz  $f_a$  bei Parallelresonanz ermitteln.

Die Induktivität der Spule  $L_p$  lässt sich ebenfalls experimentell bestimmen und ist definiert als:

$$L_p = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 \cdot C_0} \quad (a) \qquad B = \frac{k_{eff}}{f_r} \quad (b) \qquad (40)$$

Die Impedanz  $|Z|$  bei der Resonanzfrequenz  $f_r$  ist real. Der Frequenzverlauf eines abgestimmten Wandlers ähnelt dem eines Bandpassfilters. Die -3dB-Bandbreite  $B$  steht im Zusammenhang mit dem effektiven elektromechanischen Koppelfaktor  $k_{eff}$  und der Resonanzfrequenz  $f_r$ .

Daraus wird ersichtlich, dass durch parallel schalten eines externen Kondensators auf die Güte Einfluss genommen werden kann. Dieser hat keinen Einfluss auf die Resonanzfrequenz.