Zur Frage der Meßgenauigkeit bei hydrobioakustischen Untersuchungen in Aquarien und Flachwassergebieten

GUSTAV FREYTAG

Institut für Fangtechnik, Bundesforschungsanstalt für Fischerei, Hamburg

ABSTRACT: On the problem of measuring accuracy in hydrobioacoustic investigations conducted in aquaria and shallow water areas. The accuracy of bioacoustic measurements lies, according to data from literature, within ± 0.01 dB referred to $1 \mu b$ or p_0 . Such high degree of accuracy is justified neither by test accuracies of noise measuring equipment nor by the properties of a sound field limited by soft boundaries. According to our measurements in aquaria of various sizes and different boundaries and the results on frequency dependent damping in columns of liquid with zero impedance by KÜHL & TAMM (1953), it can be demonstrated that the sound propagation in an aquarium is considerably reduced below the lowest cut-off-frequency and that the damping of sound waves can reach 20 dB or more due to the soft sound field boundaries. It is pointed out that no type of aquarium is suitable for measurements of sound pressure and relative amplitudes of a given spectrum in the frequency range of bioacoustical interest. From the standpoint of physical measuring techniques all bioacoustical data measured in aquaria are incorrect.

EINLEITUNG

In der hydrobioakustischen Literatur der letzten Jahre läßt sich eine Zunahme kritischer Äußerungen zum Problem der Meßgenauigkeit in Aquarien feststellen (SCHNEIDER 1964, HAWKINS & CHAPMAN 1966). Während noch in den 50er Jahren das begrenzte Aquarienbecken – durch Auslegen mit gummierten Tierhaarmatten in seinen Schallfeldeigenschaften „verbessert“ – als adäquates Schallfeld angesehen wurde (FISH 1954), stellen HAWKINS & CHAPMAN (1966) bei ihren Messungen fest, daß diese Tierhaarmatten weder die Störschalleinstreuung von außen noch die „Reflexionen“ im Inneren des Beckens reduzieren, und sie kommen zu dem allgemeinen Schluß, „that the tank conditions provided only a poor approximation to free field conditions“.

In dem Standardwerk „Acoustic Behaviour of Animals“ von BUSNEL (1963) findet sich noch kein Beitrag, der auf diese Zusammenhänge eingeht. PARVULESCU (1964) sprach als Akustiker auf dem Bimini Symposium über die allgemeinen Grundlagen der Hydroakustik, schwächte jedoch die Entschiedenheit seiner Aussage: “so would a swimming-pool or aquarium designed without concern for acoustics” durch nachträgliche Einschränkungen ab.

Bei frequenzunbewerteten Schalldruckangaben tierischer Unterwassergeräusche hat sich ein Standard der Meßgenauigkeit herausgebildet, der bei $\pm 0,01$ dB bezogen

auf $1 \mu\text{b}$ beziehungsweise $p_0 (= 2 \times 10^{-4} \mu\text{b})$, Schalldruck der menschlichen Hörschwelle bei 1000 Hz) liegt¹. Welche Dezimale kann bei diesen Druckangaben noch als gesichert angesehen werden?

Die Meßgenauigkeit wird durch 2 Faktoren bestimmt: durch die apparative Meßgenauigkeit sowie durch die Unsicherheiten des Schallfeldes.

Das Optimum der apparativen Genauigkeit liegt bei hochwertigen elektro-akustischen Meßgeräten bei 1 % vom Endwert, das heißt bei $\pm 0,1 \text{ dB}$. Die Meßgenauigkeit zeigt in einer Kette von Aufnahme- und Analysengeräten von Gerät zu Gerät gewisse Unterschiede, die sich zwischen $\pm 0,1$ und $\pm 2,0 \text{ dB}$ bewegen. Die erreichbare apparative Genauigkeit liegt also bei $\pm 0,1 \text{ dB}$. Sie rechtfertigt somit die Angabe einer zweiten Dezimalen nicht. Über das Ausmaß der Meßunsicherheit, hervorgerufen durch die besonderen Schallfeldbedingungen in Aquarien, liegen in der bioakustischen Literatur nur vereinzelte und teilweise unklare Angaben vor (TAVOLGA & WODINSKY 1963, PARVULESCU 1964).

Das Ausmaß der in Aquarien zu erwartenden frequenzabhängigen Dämpfung liegt im Bereich von 0 bis 10 dB/cm. Gegenüber diesen Schwankungen fällt die apparative Meßgenauigkeit überhaupt nicht ins Gewicht. Da eine „Aquarienakustik“ meßtechnisch indiskutabel ist, haben sich Physiker mit Messungen in Wasserbecken mit den Abmessungen $4 \times 6 \times 4 \text{ m}$ im Frequenzbereich unter 5 kHz nicht beschäftigt. Die Ergebnisse von Dämpfungsmessungen in ein- oder allseitig schallweichen Rohren, die vor 25 Jahren mit anderen Zielsetzungen durchgeführt wurden, lassen sich jedoch auf die Schallfeldsituation in Aquarien uneingeschränkt übertragen. In diesen vor 15 Jahren erschienenen Arbeiten wird das Ausmaß der in schallweichen Aquarien zu erwartenden Dämpfung der Schallenergie deutlich (KÜHL & TAMM 1953).

Die vorliegende Arbeit gibt einen kurzen Abriss der theoretischen Grundlagen zur Schallfeldsituation in Aquarien und zeigt anhand von Meßergebnissen, welche Bedeutung den Schallaufzeichnungen in dem den Bioakustiker interessierenden Frequenzbereich in begrenzten Becken zuzumessen ist. Da es keine zusammenfassenden Arbeiten über dieses Spezialgebiet gibt, wird den Quellenhinweisen eine besondere Bedeutung eingeräumt.

DAS SCHALLFELD IM SCHALLHARTEN MESSBECKEN

Die halbe Wellenlänge der Grundfrequenz, das heißt, des Eigentons niedrigster Frequenz, mit dem ein Aquarium angeregt werden kann, ist durch die größte Dimension des Beckens gegeben. In einem ummauerten schallharten Betonbecken von 1,5 m Länge beträgt die Grundfrequenz, entsprechend $\lambda/2 = 1,5 \text{ m}$, also 500 Hz. Unter 500 Hz gibt es keinen Eigenton des Raumes; diese Wellenlängen werden nur sehr schwach angeregt.

Von einem harmonisch aufgebauten Geräusch mit einer Grundfrequenz von 250 Hz, das ein Fisch in diesem Becken abstrahlt, erfaßt man meßtechnisch nur die erste und die folgenden Harmonischen des Geräusches (500, 750 Hz etc.), die in diesem

¹ dB-Zahl = $20 \log \frac{\text{Schalldruck } 1}{\text{Schalldruck } 2}$

schallharten Becken stehende Wellen bilden können und sich bei bestimmten Frequenzen, die durch die räumlichen Abmessungen des Beckens gegeben sind, resonanzartig verstärken.

Stimmt der Grundton oder einer der Obertöne des Fischgeräusches zufällig mit einer der Eigenresonanzen des Beckens überein, so erfolgt ein starker Druckanstieg; dieses jedoch nur dann, wenn sich der Fisch an einem Ort größter Schwingungsweite (Bauch) befindet, an dem ein Druckmaximum herrscht. Das Druckverteilungsmuster im Tank ist von der Art, daß an einem Beckenende ein Maximum an Schalldruck herrscht, in der Mitte des Beckens ist der Schalldruck praktisch = 0 (Knoten) und am anderen Ende des Beckens ist wiederum ein Druckmaximum. In Abhängigkeit davon, wo sich der Fisch jeweils im Becken befindet, erzeugt er also in einem Druckbauch Schalldruck; steht das Tier in der Mitte des Beckens, so kommt kein Schalldruck zustande. Die Eigentöne eines derartigen schallharten Hallraumes mit praktisch verlustloser Reflexion bilden ein Muster stehender Wellen, deren Frequenzen von den Abmessungen in den drei Raumrichtungen gegeben sind. Für bestimmte, auszuzeichnende Einzel Frequenzen lassen sich am Beckenrand Marken anbringen, die die jeweiligen Knoten und Bäuche markieren. Zur Aufzeichnung von Geräuschen mit regelloser Charakteristik („transients“) und unendlich dicht liegenden Frequenzen der Teiltöne ist ein allseitig schallhartes Becken denkbar ungeeignet. Das Verteilungsschema der stehenden Wellen ist noch wesentlich komplexer, als es die Modelltheorie fordert. Die Schwierigkeiten in der Feststellung der Druckverteilung in einem Sonar-Meßtank beschreibt BATCHELDER (1963).

Die Reflexionsprobleme lassen sich mit der Theorie der eindimensionalen Schallausbreitung lösen (SKUDRZYK 1954). In einem Schallfeld mit schallharter Begrenzung ist die Amplitude der reflektierten Welle gleich der der einfallenden Welle, und der daraus resultierende Schalldruck stellt eine stehende Welle dar; die Schallschnelle geht an der Reflexionsebene auf 0 zurück, während der Druck an dieser Stelle auf das Doppelte ansteigt. Die Schallwelle wird so reflektiert, daß sich an der starren Begrenzungsfläche die Druckkomponenten der einfallenden und der reflektierten Welle addieren.

Allseitig schallharte Becken kommen für bioakustische Untersuchungen kaum in Betracht, da ein Aquarium normalerweise oben schallweich zu sein pflegt, so daß der Druck an der Oberfläche beim Übertritt in den Luftraum im Verhältnis der Schallwellenwiderstände (150 000:43) zusammenbricht.

In Anbetracht der außerordentlich hohen Schallimpedanz des Wassers müssen selbst Betonwände eine Stärke von mehreren Dezimetern aufweisen, um eine genügend hohe Federungsimpedanz zu erreichen (vgl. SKUDRZYK 1954, p. 128).

SCHALLABSORPTION

Eine notwendige Voraussetzung in der Wasserschallmeßtechnik besteht darin, über ein definiertes Schallfeld zu verfügen. Da im Labor stets begrenzte Wasserbecken zur Verfügung stehen, kann man rein fortschreitende Wellen nur erhalten, wenn man die Wände des Meßbeckens reflexionsfrei macht. Man benötigt hierfür Schallschluckstoffe, die in einem großen Frequenzbereich die auftreffende Schallenergie weitgehend absor-

bieren und damit die Wände akustisch nicht erkennbar machen. Eine Vollabsorption ist unerreichbar. Hochabsorbierende Schluckstoffe absorbieren $\frac{9}{10}$ des auftreffenden Schalldrucks, $\frac{1}{10}$ (bezogen auf das komplexe Verhältnis der Amplituden) wird reflektiert; das sind energiemäßig 1 %. Die Ausschaltung stehender Wellen in schallharten Becken ist jedoch nur erreichbar bei optimaler Gestaltung und Materialzusammensetzung der absorbierenden Schicht und wenn die Schichtdicke mindestens $\frac{1}{4}$ der geforderten unteren Grenzwellenlänge beträgt (MEYER & TAMM 1951/1952, MEYER & OBERST 1951/1952, TAMM 1957).

Eine Schallschluckanordnung hat zwei Aufgaben zu erfüllen; die Vernichtung des Schalles innerhalb der Anordnung durch Absorption und die reflektionsfreie Überführung in die Anordnung durch Anpassung an die akustische Impedanz des Wassers. Durch Auszacken der Schluckstoffe (Keil- und Pyramidenform) wird ein gleitender Übergang zwischen dem Schallwellenwiderstand des Wassers und dem des Absorbers erzielt. Die angestrebte untere Grenzfrequenz bestimmt die Schichtdicke des Absorbers. In dem den Hydrobioakustiker interessierenden niederen Audiofrequenzbereich von 50 Hz bis 4 kHz liegen breitbandige Absorber mit $\frac{1}{4}$ -Schichtdicken jenseits rationeller Herstellbarkeit. Sechsförmig mit Absorbern ausgekleidete Wasserschallmeßbecken, zum Beispiel in den Dimensionen von $4 \times 4 \times 6$ m eignen sich für Messungen oberhalb 5 kHz (KUHLE 1952). Unterhalb 5 kHz überschreitet der Reflexionsfaktor in diesen Becken die 10-%-Grenze; außerdem entsteht vor jeder absorbierenden Oberfläche eine Störzone, die bei Messungen ausgespart werden muß (TAMM 1957, p. 284, MEYER, SCHILZ & TAMM 1960).

In früheren Arbeiten (z. B. FREYTAG 1964) ist eine absorbierende Wirkung von gummiertem Tierhaar in Schichtdicken von 4–7 cm angenommen worden. Durch Vergleichsmessungen konnte die Wirkungslosigkeit derartiger Materialien bestätigt werden. Nach dem Einbringen dieser Tierhaarmatten in das wassergefüllte Becken setzt zwar zunächst ein geringer Absorptionseffekt ein, der auf Lufteinschlüsse und den auf der Gummiumhüllung der Tierhaare haftenden Luftfilm zurückzuführen ist. Die eingeschlossene Luft geht jedoch später in Lösung; außerdem besteht ein ausgesprochener Frequenzgang der Dämpfung in Abhängigkeit von der Größe der eingeschlossenen Luftblasen (MEYER & SKUDRZYK 1953). Ein derartiges Material schützt weder gegen Störschall von außen, noch absorbiert es im Bereich der hier interessierenden Wellenlängen.

In der bioakustischen Literatur ist porösen Materialien eine absorbierende Wirkung unterstellt worden (TAVOLGA & WODINSKY 1963). Poröse Stoffe schlucken, im Gegensatz zu ihrem Verhalten in Luft, den Wasserschall sehr schlecht, da sie auf die Schallschnelle einwirken, die im Wasser wesentlich kleiner ist als in der Luft. Günstiger ist die andere Möglichkeit, die Schallenergie durch Verluste zu vernichten, welche durch den Schalldruck hervorgerufen werden, d. h. durch sogenannte Nachwirkungsverluste. Durch Relaxationsvorgänge in Gummi und Kunststoffen wird bewirkt, daß Kompression und Druck nicht in Phase sind, was mit Absorption gleichbedeutend ist.

Daß die Schallenergie, um beträchtlich geschwächt zu werden, um einen gewissen Teil der Wellenlängen in den Absorber eindringen muß, erscheint verständlich. Aperiodische, das heißt nicht abgestimmte Absorber benötigen bei optimaler Gestaltung und Materialbeschaffenheit die bereits erwähnte $\frac{1}{4}$ -Mindestschichtdicke; dafür haben diese

Schluckanordnungen jedoch den Vorteil einer breitbandigen Wirksamkeit. Bei Resonanzabsorbern, zum Beispiel bei Gummimatten zur akustischen Tarnung von U-Bootskörpern, kommt man mit wesentlich geringeren Schichtdicken aus; die absorbierende Wirkung in der gewünschten Größenordnung von 90 % erstreckt sich jedoch nur auf 1 Oktave (MEYER & OBERST 1951/1952).

Für alle breitbandigen Absorber gelten die durch die untere Grenzfrequenz festgelegten $\lambda/4$ -Schichtdicken, wodurch ihre Verwendbarkeit für bioakustische Untersuchungen entfällt (MEYER & TAMM 1951/1952).

DAS AQUARIUM MIT SCHALLWEICHER SCHALLFELDBEGRENZUNG

Anknüpfend an die theoretischen Betrachtungen zur schallharten Druckkammer bricht an den Wänden des schallweichen Aquariums der Schalldruck an der Begrenzungsfläche Wasser/Luft zusammen. Die Aquarienwandung kann in Anbetracht der Wellenlängen vernachlässigt werden. Ein Absinken des Druckes bis auf den Wert 0 wird nur erreicht, wenn das Medium außerhalb des Beckens ideal schallweich ist. Zwar wird auch in schallweichen Becken der Druck an der Grenze Wasser/Luft reflektiert, jedoch gegenphasig. Die reflektierte Welle erleidet eine Phasenverschiebung, wodurch sich die hinlaufende und reflektierte Welle auslöschen; die Strömungsgeschwindigkeiten (Schallschnellen) addieren sich dagegen an diesem Ort. An einer schallweichen Begrenzungsfläche ist somit die Schallschnelle doppelt so groß wie in der einfallenden Welle, während der Schalldruck vollkommen verschwindet.

Sowohl im schallharten Hallraum wie im schallweichen Becken finden an den Begrenzungsflächen Reflexionen statt, jedoch wird der Druck in einem Falle gleichphasig, im schallweichen Becken gegenphasig zurückgeliefert. Diese Phasenverschiebung wird bei Beschreibungen von Schallfeldverhältnissen in Aquarien häufig nicht erwähnt. So schreibt PARVULESCU (1964) in seinen Ratschlägen für Bioakustiker, eine schallweiche Wand "reflects sound far better than the best mirrors reflect light". Diese Feststellung hat eine Reihe von Bioakustikern in der Auffassung bestärkt, Glas-, Eternit- und Kunststoffaquarien müßten mit schallschluckenden Materialien ausgelegt werden, um die Reflexionen zu vermeiden. In der Tat bricht jedoch der Schalldruck vom Sender aus in Richtung auf die schallweiche Aquarienwand, exponentiell abfallend, zusammen. Im Mittelpunkt des Wasserkörpers herrscht der relativ höchste Schalldruck, unmittelbar vor der Begrenzungsfläche liegt ein Fast-Knoten, kurz hinter der Wand der Druckknoten (SKUDRZYK 1954, p. 128, Abb. 38). Das schallweiche ebenso wie das schallharte Becken sperrt unterhalb der durch die größte Dimension des Beckens gegebenen halben Wellenlänge die Schallausbreitung vollkommen (Abb. 1).

Quantitativ überschaubar werden die Verhältnisse mit der Einführung der *Schallkennimpedanz* (Akustischer Widerstand $\Omega = \rho \cdot x \cdot c$). Ähnlich wie die elektrische Impedanz durch das Verhältnis der Spannung zur Stromstärke, ist die akustische Impedanz als das Verhältnis des Schalldrucks zur Schallschnelle in der in die Reflexionsfläche weisenden Richtung definiert. Unter Zugrundelegung eines Eternitbeckens von 10 mm Wandstärke ergeben sich dabei folgende Werte (in CGS-Einheiten): Wasser 150 000 Ω , Eternit $4 \cdot 10^5 \Omega$, Luft 43 Ω . Die *Massenimpedanz* der Eternitwandung von

1600Ω errechnet sich aus der Dichte ($\rho = 2,5$) $\times \omega (= 2 \pi f)$, wobei als Referenzfrequenz 100 Hz angenommen werden, multipliziert mit der Wandstärke von 1 cm. Eine derartig geringe Schichtdicke ist in ihrer Relation zur Wellenlänge ohne Einfluß auf die Schallwelle, so daß es sich im Endeffekt um ein Impedanzverhältnis von

Abb. 1: Frequenzabhängigkeit der Dämpfung in einem allseitig schallweichen Aquarium mit den Abmessungen $50 \times 50 \times 30$ (T) cm und einer Eternitwandstärke von 10 mm. Berechnet nach KUHLE & TAMM (1953)

150 000:43 handelt. Aus einer einfachen Überschlagsrechnung ergibt sich, welche Wandstärken zu erstellen sind, um die Impedanz des Wassers zu erreichen. Aquarienwandungen aus Glas, Trovidur etc. verhalten sich analog. Ummauerte Becken liegen nur graduell günstiger; auch sie sind ja nach oben hin schallweich, so daß der Druck an der Oberfläche zusammenbricht. Die Dämpfung in einem einseitig schallweich begrenzten Becken ist um 2 bis 4 dB/cm geringer als in allseitig schallweichen Aquarien (KUHLE & TAMM 1953, p. 305, Abb. 3; TAMM 1941). In schallweichen Aquarien kann man oberhalb der unteren Sperrfrequenz zwar noch etwas messen, aber nur in unmittelbarer Nähe der Schallquelle. Ein Fisch muß zu diesem Zweck in den Mittelpunkt des Wasserraumes gebracht werden. Schwimmt der Fisch dagegen am Rande des Beckens, und das Hydrofon befindet sich in der Mitte, so „verpufft“ der Schalldruck nach dem Prinzip von *actio = reactio* aus dem Becken heraus im Verhältnis der Impedanzen. Den Schalldruck kann man also nur in unmittelbarer Nähe des Fisches messen. Es ist jedoch unmöglich, von diesen Nahfeldmessungen auf das Spektrum umzurechnen, das man in der freien Natur erfassen würde. Die Bezeichnung „Nahfeld“ könnte falsche Vorstellungen erwecken, als wäre dieses „Nahfeld“ allein von den geometrischen Strahlungsverhältnissen (Schwimmblyse) abhängig, so daß zum Beispiel alle Aufpunkte, die um das Zehnfache des Radius vom Membranmittelpunkt entfernt liegen, nicht mehr zum „Nahfeld“ rechnen. Es kommt jedoch außerdem auch auf die Wellenlängen an (STENZEL & BROSE 1958), wie überhaupt das Schallfeld in unmittelbarer Nähe des

Senders ein kompliziertes Interferenzfeld darstellt, in dem die Schalldruckabnahme mit der Entfernung äußerst undurchsichtig bleibt (SKUDRZYK 1954, p. 874).

Der Bioakustiker wird also in jedem Falle nur die oberen Spektrumannteile eines Fischgeräusches und auch diese, infolge der weichen Schallfeldbegrenzung, nur mit vermindertem Schalldruck aufzeichnen können. Unter günstigsten Bedingungen kann man gerade noch die Tonhöhe wahrnehmen, die relativen Amplituden der Teiltöne kann man in einem derartigen Becken nicht exakt bestimmen. Im freien Wasserraum treten bei fortschreitender Wellenausbreitung in dem Geräuschespektrum des Fisches völlig „neue“ Frequenzen auf. In diesen Zusammenhängen liegen die Ursachen dafür, daß man die dem Horcheindruck nach von Aquarienaufzeichnungen her bekannten Geräusche einer Fischart im freien Wasserraum nicht wiedererkennt (vgl. HAWKINS & CHAPMAN 1966, FREYTAG 1967).

Aquarien und Becken herkömmlicher Bauart sind als Schallfeldbegrenzung für die Aufzeichnung von repräsentativen Schalldrucken aus folgenden Gründen nicht geeignet:

(1) Das Schallfeld ist in seinen Abmessungen zu klein gegenüber den Wellenlängen der Tiergeräusche. Der Fisch befindet sich in einer analogen Situation zu einer angeschlagenen Stimmgabel. Diese ist auf Grund ihrer geringen Abmessungen nicht in der Lage, die Wellenlänge ihres Eigentons abzustrahlen. Erst nach Aufsetzen der Gabel auf einen Gegenstand von größerer Abmessung wird die Eigenschwingung kräftig wiedergegeben.

(2) Die Schallfeldbegrenzung ist schallweich. Wenngleich man in ausgekachelten Betonbecken geringfügig günstigere Werte erhält, so sind alle Aquarien auf Grund des unteren Sperrbereichs der Ausbreitung und des in Richtung auf die Begrenzungsflächen hin exponentiell abfallenden Schalldrucks für bioakustische Untersuchungen nicht geeignet.

(3) Es hängt weitgehend davon ab, ob sich der Fisch zur Zeit der Geräuscherzeugung wandnah oder im Mittelpunkt des Beckens befindet. Durch eine einfache Versuchsanordnung ist diese Tatsache zu belegen. Man bringt das Hydrofon in den Schwerpunkt des Wasserkörpers und führt den Fisch bzw. den Unterwasserlautsprecher im Becken umher. Die dabei auftretenden Pegelschwankungen liegen im Bereich von 10 bis 30 dB. Diese Tatsache steht im Gegensatz zu der allgemeinen Erfahrung, daß die Dämpfung gerade beim Wasserschall außerordentlich gering ist.

DIE MESSUNG DES FREQUENZGANGES DER DÄMPFUNG IN AQUARIEN

Meßanordnung

Als Tongenerator wurde ein Bruel und Kjaer Schwebungssummer (Typ 1022) verwendet, der ein kontinuierliches Audiospektrum von 20 bis 20 000 Hz mit 500 mV an 60 Ω an den Eingang eines Tonfrequenzverstärkers (Typ UV 12/12 W) lieferte. Der Verstärker steuerte einen Unterwasserlautsprecher von 15 W der AGK Wien, Typ P 2008 aus. Ein Hydrofon (Typ HP 40, Pons, Marseille) mit angeschlossenem 20-dB-Verstärker und nachfolgendem Tonbandgerät (Nagra III B) dienten zur Geräuschaufzeichnung. Das Hydrofon wurde in definierten Entfernungen vom Lautsprecher im

freien Wasser schwebend aufgehängt und die frequenzabhängigen Schwankungen des Tonfrequenzspektrums mit zunehmender Entfernung vom Lautsprecher mit einem Pegelschreiber aufgezeichnet. Eine Synchronstart- und Wiedergabeeinrichtung garantierte die papiersynchrone Aufzeichnung. Von 150 Messungen, die in Aquarien verschiedener Größe und Wandbeschaffenheit durchgeführt wurden, sind zwei Messungen, im Kachelbecken 135 und Eternitbecken 400, ausgewählt worden.

Kachelbecken 135

Das mit Kacheln ausgelegte Betonbecken hatte sehr unterschiedliche Wandstärken, die im Minimum 15 cm, im Maximum, durch Einbeziehung eines Stützpfeilers, 44 cm betragen. Der Wasserkörper von 135 Litern hatte die Abmessungen von $58 \times 77 \times 30$ (T) cm. Der Schallsender wurde vor der einen Längswand auf eine gummierte Tierhaarmatte gelegt. In Abständen von 1, 10, 20 und 30 cm vom Lautsprecher wurden Aufzeichnungen des Tonfrequenzspektrums durchgeführt. Während einer Aufnahmeserie, die aus mehreren Meßreihen bestand, wurden die Knopfstellungen sämtlicher Geräte konstant gehalten sowie das Kristallsystem des Hydrofons mit den freien Kristallflächen konstant zum Lautsprecher hin orientiert.

In einer Entfernung von 1 cm vom Lautsprecher erhält man durch den Wandler ein überraschend gutes Frequenzband im Bereich von 20 Hz bis 6 kHz. Jedoch bereits 9 cm weiter vom Lautsprecher entfernt kommt es in Frequenzbreiten von $\frac{1}{3}$ bis zu $\frac{2}{3}$ Oktaven zu einem Ausfall im Spektrum. In 20 und schließlich 30 cm Entfernung lösen die Pegelschwankungen den Eindruck eines zusammenhängenden Spektrums vollkommen auf, wobei eine besonders starke Ausbreitungsdämpfung im Bereich der tieferen Frequenzen zu beobachten ist (vgl. Abb. 2).

Eternitbecken 400

Das für die Messungen benutzte Becken mit 15 mm Eternitwandstärke hatte die Abmessungen von $150 \times 60 \times 50$ cm. Es wurde in strenger Analogie zu den Versuchen in Kachelbecken 135 mit den gleichen Schalleistungen gearbeitet. Wie der Abbildung 3 zu entnehmen ist, kommt in diesem schallweichen 400-Liter-Becken unter 250 Hz überhaupt kein Schalldruck zustande. Im Abstand von 1 cm vom Lautsprecher überträgt das Hydrofon ein Tonfrequenzspektrum, das mit großen Pegelschwankungen bei 80 Hz beginnt und erst ab 2 kHz einen ruhigeren Verlauf zeigt. Bei Distanzen von 30 cm und mehr bricht der Schalldruck schließlich vollkommen zusammen und unterschreitet im gesamten Bereich bis zu 2 kHz die 0-dB-Linie. In einer Entfernung von 110 cm vom Lautsprecher, in der sich das Hydrofon dann 2 cm von der gegenüberliegenden Beckenwand befindet, steigen die Amplituden zwischen 160 bis 400 Hz mit einem Maximum von 15 dB wieder über die 0-Linie; diese Reflexionen sind darauf zurückzuführen, daß die Aquarienwandung eine endliche Schallweichheit aufweist.

In Eternit-, Glas- und Kunststoffaquarien ist der aufgezeichnete Tiergeräuschpegel also weitgehend abhängig von der Entfernung zwischen Tier und Hydrofon, wobei die

Abb. 2: Schalldruckmessungen in einem 135-Liter-Kachelbecken im Frequenzbereich von 20 bis 20 000 Hz in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Lautsprecher und Hydrofon. Dynamikbereich 25 dB

Schwankungen 20 bis 30 dB betragen können. Ausgehend von der unteren Grenzfrequenz, unterhalb der das Aquarium für größere Wellenlängen vollkommen gesperrt ist, ist es darüber hinaus von Bedeutung, welche Entfernung der Sender von der nächstliegenden schallweichen Wand einhält.

FREIFELDMESSUNGEN

Bei der Verfolgung des Schalldruckes in Abhängigkeit von der Entfernung des Senders lassen sich bekanntlich einzelne Zonen abgrenzen, die sich durch die Art der

Abb. 3: Schalldruckmessungen in einem 400-Liter-Eternitbecken im Frequenzbereich von 20 bis 20 000 Hz in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Lautsprecher und Hydrofon.
Dynamikbereich 50 dB

Schallausbreitung voneinander unterscheiden. In unmittelbarer Sendernähe entsteht ein kompliziertes Interferenzfeld, Druck und Schnelle sind nicht in Phase. Dieser Nahfeldbereich ist weiterhin definiert durch das Verhältnis der abstrahlenden Membranfläche zur abgestrahlten Wellenlänge. Mit wachsendem Abstand vom Sender wird die Schallausbreitung kugelwellenartig, und der Schalldruck nimmt umgekehrt proportional der Entfernung von der Schallquelle ab. In noch größerer Entfernung treten dann vom Meeresboden und von der Wasseroberfläche kommende Reflexionen hinzu, die zu einer Reihe von Interferenzen Anlaß geben. Erst in Entfernungen, die im Vergleich zur Wassertiefe sehr groß sind, kann man den Wasserraum als gleichmäßig vom Schall erfüllt ansehen.

Abb. 4: Flachwassergehege für bioakustische Messungen im Kleinen Belt; Ozeanographische Station Anton Bruun, Strib (Dänemark)

Freiwasser-Meßplätze lassen sich mit relativ geringen Mitteln erstellen (Abb. 4). Das Foto zeigt die durch Maschendraht abgegrenzten Gehege der ozeanographischen Station „Anton Bruun“ in Strib auf Fünen (Dänemark). Wenngleich sich die Schallwandler (Hydrofone) in diesen Becken noch im Bereich kugelwellenartiger Schallausbreitung befinden, so lassen sich in dem für Bioakustiker wichtigen Bereich niedriger Audiofrequenzen, in dem zum Beispiel die Grundfrequenzen der Schwimmblasengeräusche der Fische liegen (40–300 Hz), meßtechnisch befriedigende Ergebnisse erzielen. Störende Bodenreflexe, deren Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit von MACKENZIE (1960) beschrieben wurde, können hier vernachlässigt werden. – Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß auf derartigen Meßplätzen in Flachwassergebieten bei 4 bis 6 m Wassertiefe noch keine gleichmäßige Schallerfüllung im Unterwasserraum gegeben ist.

BIOLOGISCHE SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aufgrund der bioakustischen Fehlmessungen im begrenzten Medium eines Aquariums ergeben sich eine Reihe von biologischen Konsequenzen. Das trifft im besonderen Maße auf physiologische Untersuchungen, wie die Bestimmung von Hörschwellen und das Tonunterscheidungsvermögen, zu, ebenso wie für „Playback-Versuche“ zum Zwecke der akustischen Verhaltensbeeinflussung. Generell müssen alle Ergebnisse, die hinsichtlich Frequenzen und Schalldrücken quantifizierend in Aquarien durchgeführt wurden, im zumindest zweiseitig unbegrenzten Schallfeld (Flachwassergebiet) überprüft werden. Das Tidengebiet der Nordsee ist hierfür ungeeignet. Bei Abwesenheit aller Stör-

geräusche im Bereich technischer Frequenzen bis 1,5 kHz wird durch Strömungseffekte, die am Kabel sowie am Wandler direkt angreifen, im Bereich von 50 bis 125 Hz ein zusätzlicher Turbulenzpegel erzeugt, der im genannten Frequenzbereich einen Zuschlag von 10 dB bewirkt. In-situ-Untersuchungen zur Feststellung der Aktivitätsrhythmen, wie der Vertikalwanderungen der Cumacee *Diastylis* und den tageszeitabhängigen Pegelschwankungen der Geräusche von *Carcinus maenas* in den Prielen der Nordsee unterliegen keinen derartigen Störeinflüssen.

Die Aufmerksamkeit von Physiologen und bioakustisch arbeitenden Ethologen galt bisher weitgehend der Simulierung natürlicher Bedingungen in Aquarien. Es ist der Zweck dieser Arbeit, auf die durch die physikalischen Schallfeldbedingungen gegebenen Grenzen bei akustischen Untersuchungen in Aquarien hinzuweisen.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Bioakustische Untersuchungen in Aquarien bieten den Vorteil einer eindeutigen Zuordnung von Tier und Geräusch. Messungen des Schalldrucks und der frequenzmäßigen Zusammensetzung eines tierischen Unterwassergeräusches sind jedoch in Aquarien nicht durchführbar, und der bisher eingehaltene Standard der Meßgenauigkeit von $\pm 0,01$ dB ist meßtechnisch nicht haltbar.
2. Das Schallfeld im Aquarium ist definiert durch die untere Grenzfrequenz, unterhalb derer die Schallausbreitung gesperrt ist, sowie durch die Schallfeldbegrenzung, die als relativ schallweich zu bezeichnen ist.
3. Die hohe Schallkennimpedanz des Wassers bedingt, daß an den schallweichen Wänden der reflektierte Schalldruck gegenphasig zurückgeliefert wird, wodurch sich hin- und rücklaufende Wellen auslöschen. Der Schalldruck eines im Schwerpunkt des Wasserkörpers befindlichen Schallsenders fällt exponentiell in Richtung auf die schallweich reflektierenden Wände ab. Absorbierende Materialien sind in den benötigten $\lambda/4$ -Schichtdicken nicht herstellbar.
4. Ein allseitig schallharter Meßtank entspricht in seinen akustischen Eigenschaften einem Hallraum, der mit den durch die drei Raumdimensionen gegebenen Grundfrequenzen resonanzartig angeregt werden kann. Zur meßtechnischen Beurteilung von tierischen Geräuschen, die sich durch eine regellose Charakteristik („transients“) und unendlich dicht liegende Teiltonbereiche auszeichnen, ist ein derartiger Hallraum ungeeignet. Die in einem derartigen Meßtank auftretenden Reflexionen müßten von einem breitbandigen Absorber geschluckt werden. Derartige Materialien sind in Anbetracht der zu erstellenden Schichtdicke und des damit verbundenen Materialaufwands erst für Frequenzen ab 5 kHz herstellbar.
5. Die frequenzabhängige Dämpfung in schallweichen Glas-, Eternit- und Kunststoffaquarien liegt oberhalb der Grenzfrequenz, unter der das Aquarium jede Wellenausbreitung sperrt, bei Werten zwischen 0 bis 10 dB/cm. Dämpfungsmessungen in herkömmlichen Aquarien zeigen, daß bereits im Abstand von 1 cm vom Lautsprecher der Schalldruck abzusinken beginnt. Ein Wandler, der auf die Registrierung der Schallschnelle ausgelegt ist, würde in direktem Massekontakt bessere Meßergebnisse zeigen als die auf Schalldruck reagierenden Hydrofone.

6. Da alle tieferen Frequenzen eines Tiergeräusches im Aquarium nicht abgestrahlt werden können, sowie die relative Intensität der Teiltöne nur verzerrt aufgenommen werden kann, ist ein Tiergeräusch im freien Wasserraum, auf Grund einer im Aquarium gewonnenen Hörerfahrung, nicht wiederzuerkennen. Alle Geräusche, die im Nahfeld eines Senders registriert werden, um einen meßbaren Schalldruck zu erhalten, lassen sich nicht auf Freifeldbedingungen umrechnen.
7. Der in einem Aquarium gemessene Schalldruck eines Tiergeräusches kann aufgrund der erwähnten Schallfeldbedingungen um 10 bis 30 dB zu niedrig liegen. Gemessen an der Gesamtdynamik tierischer Unterwassergeräusche, müssen derartige Meßergebnisse als falsch bezeichnet werden.

ZITIERTER LITERATUR

- ALBERS, V. N., 1965. Underwater acoustics handbook. 2nd ed. Pennsylvania State Univ. Pr. University Park, Pa, 356 pp.
- BATCHELDER, L., 1963. Investigation of reverberant sound field in a concrete sonar test tank. *J. acoust. Soc. Am.* **35**, 775–786.
- BUSNEL, R. G. (Ed.), 1962. Acoustic behaviour of animals. Elsevier, Amsterdam, 933 pp.
- FISH, M. P., 1954. The character and significance of sound production among fishes of the western North Atlantic. *Bull. Bingham oceanogr. Coll.* **14** (3), 1–109.
- FREYTAG, G., 1964. Beiträge zur marinen Bioakustik der Nord- und Ostsee. 1. *Trigla gurnardus* L., der Graue Knurrhahn. *Arch. FischWiss.* **15**, 23–33.
- 1967. Quantitative Ergebnisse zur marinen Bioakustik der Nord- und Ostsee. In: BMV-Bericht 1–129.
- HAWKINS, A. D. & CHAPMAN, C. J., 1966. Underwater sounds of the Haddock, *Melanogrammus aeglefinus*. *J. mar. biol. Ass. U. K.* **46**, 241–257.
- KUHL, W., 1952. Über Messungen in einem schallschluckend ausgekleideten Wasserschall-Meßbecken. *Akust. Beih.* **2**, 140–144.
- 1953. Die Eigenschaften wassergefüllter Rohre für Widerstands- und Schallgeschwindigkeitsmessungen. *Acustica* **3**, 111–123.
- OBERST, H. & SKUDRZYK, E., 1953. Impulsverfahren zur Messung der Reflexion von Wasserschallabsorbern in Rohren. *Akust. Beih.* **3**, 421–433.
- & TAMM, K., 1953. Messung der Schallausbreitung in flüssigkeitsgefüllten Rohren mit schallweichen Wänden. *Acustica* **3**, 303–316.
- MACKENZIE, K. V., 1960. Reflection of sound from coastal bottoms. *J. acoust. Soc. Am.* **32**, 221–231.
- MEYER, E. & OBERST, H., 1951/52. Resonanzabsorber für Wasserschall. *Akust. Beih.* **1**, 149–170.
- SCHILZ, W. & TAMM, K., 1960. Über den Bau eines reflexionsfreien Wasserschall-Meßbeckens. *Acustica* **10**, 281–287.
- & SKUDRZYK, E., 1953. Über die akustischen Eigenschaften von Gasblasenschleiern in Wasser. *Acustica* **3**, 434–440.
- & TAMM, K., 1951/52. Breitbandabsorber für Flüssigkeitsschall. *Akust. Beih.* **1**, 91–104.
- PARVULESCU, A., 1964. Problems of propagation and processing. In: Marine bioacoustics. Ed. by W. N. Tavolga. Pergamon Pr., Oxford, 87–111.
- SCHNEIDER, H., 1964. Physiologische und morphologische Untersuchungen zur Bioakustik der Tigerfische (Theraponidae). *Z. vergl. Physiol.* **47**, 493–558.
- SKUDRZYK, E., 1954. Die Grundlagen der Akustik. Springer, Wien, 1084 pp.
- STENZEL, H. & BROSE, O., 1958. Leitfaden zur Berechnung von Schallvorgängen. 2. Aufl. Springer, Wien, 168 pp.

- TAMM, K., 1941. Ein- und zweidimensionale Ausbreitung von Wasserschall im Rohr bzw. im Flachbecken. *Akust. Z.* **6**, 16–34.
- Broad band absorbers for water-borne sound. *In: Technical aspects of sound.* Ed. by E. G. Richardson. Elsevier, Amsterdam, Vol. **2**, 240–286.
- TAVOLGA, W. N. (Ed.), 1964. Marine bio-acoustics. Pergamon Pr., Oxford, 413 pp.
- & WODINSKY, J., 1963. Auditory capacities in fishes. Pure tone thresholds in nine species of marine teleosts. *Bull. Am. Mus. nat. Hist.* **126**, 177–240.

Diskussion im Anschluß an den Vortrag FREYTAG

ZEITZSCHEL: Warum kombinieren Sie nicht Ihr Hydrofon mit einer Fernsehkamera, um sicher zu sein, welche Tiere Sie hören?

FREYTAG: Unsere Unterwasserhordhausrüstung ist netzunabhängig ausgelegt, um sie ortsbeweglich von kleineren Fahrzeugen aus, die akustisch leicht ruhigzustellen sind, oder auch vom Schlauchboot aus einsetzen zu können. Eine Unterwasser-Fernsehanlage würde gewichtsmäßig den Rahmen unserer „Reporterausrüstung“ sprengen. Zudem steht der zu erwartende Erfolg in keinem vertretbaren Verhältnis zum materiellen Aufwand, wie amerikanische Untersuchungen gezeigt haben (An acoustic-video system for marine biological research; in: W. N. TAVOLGA, Marine bio-acoustics, 1964).

GREVE: Würde die Geräuschklassifikation es erlauben, eine ständige Aktivitätsmessung bei dichten Crustaceen-Besiedlungen oder auch bei Einzeltieren mit festem Standort durchzuführen oder sind die äußeren Störungen so groß, daß Freilanduntersuchungen dieser Art unmöglich sind? Lassen sich die Störgeräusche durch Annäherung an das Objekt umgehen?

FREYTAG: Krebsgeräusche sind sehr charakteristisch; wenn Sie eine Krebsart als Geräuscherzeuger identifiziert haben, kann man den Tagesgang der Aktivität in situ leicht aufzeichnen. Das ist bereits mehrfach gemacht worden, vor allem bei Alpheiden. In der Eckernförder Bucht haben wir die während der Dunkelheit beginnende Vertikalwanderung der Cumacee *Diastylis* bioakustisch erfaßt. Durch Annäherung an den Geräuschproduzenten läßt sich natürlich das Nutz-/Störpegelverhältnis verbessern. Infolge der Breitbandigkeit der Krebsgeräusche sind die Verhältnisse nicht so kritisch wie bei vielen Fischgeräuschen, deren größte Energiedichte im Bereich technischer Frequenzen liegt.