Ein Demonstrationsexperiment zur parametrischen Schallerzeugung in Luft

Volker Mellert, Roland Kruse, Bastian Epp
Universität Oldenburg, Institut für Physik, AG Akustik, 26111 Oldenburg, Deutschland,
Email: volker.mellert@uni-oldenburg.de

Einleitung

Man stelle sich vor, dass eine Fledermaus in einen HiFi-Laden einfliegt, um sich eine neue Heimstereoanlage zu kaufen. Bekanntlich haben die Fledermäuse sehr gute und empfindliche Ohren, so dass der Verkäufer sich wahrlich Mühe geben wird, einen hochwertigen Luftschallwandler für Ultraschall zu verkaufen. „Wir haben gerade einen hervorragenden neuen Ultraschalllautsprecher hereinbekommen“, preist der Verkäufer den Ultraschallwandler AT75 der Firma Airmar an [1]. Bevor die Fledermaus allerdings den Wandler erwirbt, will sie sicher sein, dass er gute Leistung bringt und wenig klirrt. „Kein Problem“, sagt der Verkäufer, „das können wir doch eben schnell messen.“.

Demonstration der Schallabstrahlung

In einem einfachen Versuchsaufbau wird der Wandler an einen Sinusgenerator (80 kHz) mit Verstärker angeschlossen. Um den Wandler mit Maximalspannung von bis zu. 300 V_{eff} versorgen zu können, wird der Sinus mit 5 - 10 ms Pulslänge und einer Wiederholrate von 1 Hz geschaltet, um thermische Überlastung zu vermeiden. Ein ½’’ Mikrofon (B&K 4135) nimmt das Signal auf, das auf einem Oszilloskop als Zeitsignal und gleichzeitig als Spektrum angezeigt wird. Direkt vor dem Wandler wird ein Schalldruck von 130 dB für 100 V_{eff} Treiberspannung gemessen. Es ergeben sich die Zeitsignale bzw. Spektren in Abb. 1 in Abhängigkeit von der angegebenen Entfernung von der Schallquelle. Mit zunehmender Entfernung scheint der Wandler immer verzerrtere Signal abzustrahlen. Wie der Verkäufer aber versichert, liegt das nicht an dem Wandler sondern leider hört (auch) die Fledermaus in einem nichtlinearen Medium, die Luft „klirrt“.

Luft ist ein nichtlineares Medium

Wird die nichtlineare Zustandsgleichung bei der Aufstellung der Bewegungsgleichungen berücksichtigt, ergibt sich für den adiabatischen Fall als Lösung für die Schnelle u (z.B. [2])

$$u(x,t) = 2u_{\max} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_n(nx/x_s)}{nx/x_s} \cdot \sin[n(\omega t - kx)] \qquad (1)$$

mit $x_s = \dfrac{c_0^2}{\varepsilon_0 \cdot \omega \cdot u_0}$, sog. shock distance, und

$\varepsilon_0 = \dfrac{\gamma+1}{2}$, wobei γ = Adiabatenexponent.

Für Distanzen < x_s gilt in quadratischer Näherung Gl. 2 und 3, aus denen man sieht, dass die Amplitude der ersten Harmonischen linear mit dem Abstand zunimmt (Gl. 2), quadratisch mit der eingeprägten (Schnelle)Amplitude und linear mit der Frequenz.

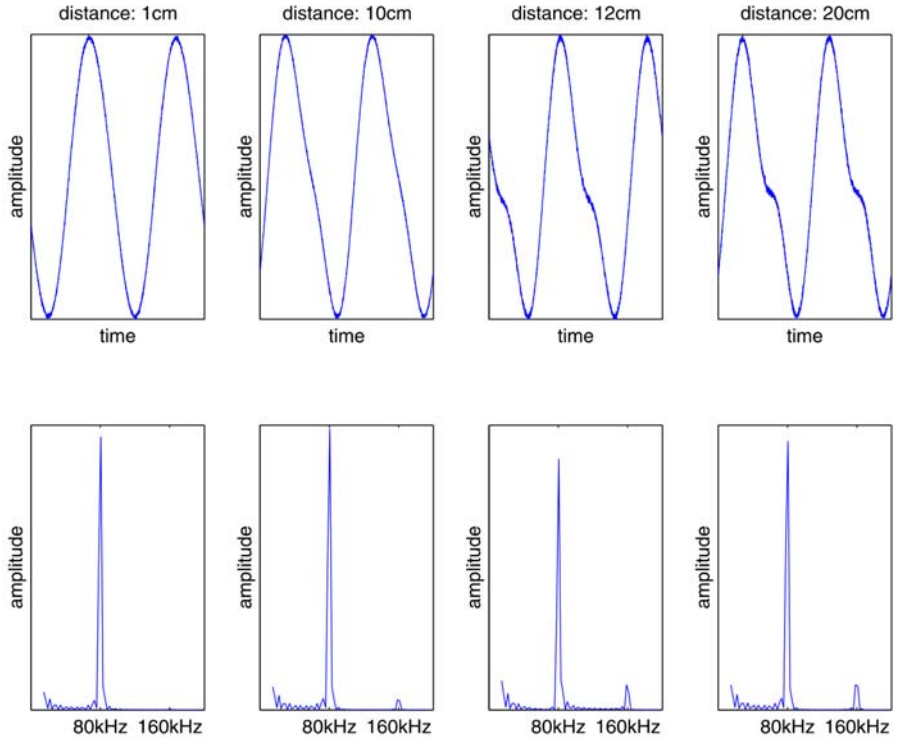

Abbildung 1:

obere Reihe: Zeitsignal eines 80 kHz Sinus, abgestrahlt mit 130 dB Schalldruck (1 cm vor dem Wandler) in Abhängigkeit von der Entfernung Wandler – Mikrofon (1, 10, 12, 20 cm).

untere Reihe : Leistungs-spektrum des jeweiligen Zeitsignals. Man erkennt die Zunahme der ersten Oberwelle mit der Entfernung, die sich auch im zunehmend verzerrten Verlauf des Zeit signals widerspiegelt.

Dies Signale sind von der Bildschirmdarstellung des Oszillographen Tektronix TDS 30148 ausgelesen.

Trägt man die in Abb. 1 gemessenen Werte des Leistungsspektrums über den Abstand x auf (relativ zur Leistung der Grundfrequenz), erhält man Abb. 2.

$$u(x,t) \approx u_{\max} \sin(\omega t - kx) + \left(\frac{u_{\max}}{c_0}\right)^2 \cdot \frac{\omega \cdot \varepsilon_0}{2} \cdot x \cdot \sin[2(\omega t - kx)] \qquad (2)$$

In quadratischer Näherung berechnet sich der Druck zu

$$p = \rho_0 \cdot c_0 \cdot u + \frac{\varepsilon_0}{2} \rho_0 \cdot u^2 \qquad (3)$$

Die wesentliche Komponente der Nichtlinearität ist die erste Harmonische, wie man auch deutlich aus der Abb. 1 sehen kann. Die relative Zunahme der Leistung der ersten Harmonischen folgt in Abb. 2 gut der Zunahme von 3 dB/ Distanzverdopplung, nach Näherung Gl. (2) wären allerdings 6 dB zu erwarten.

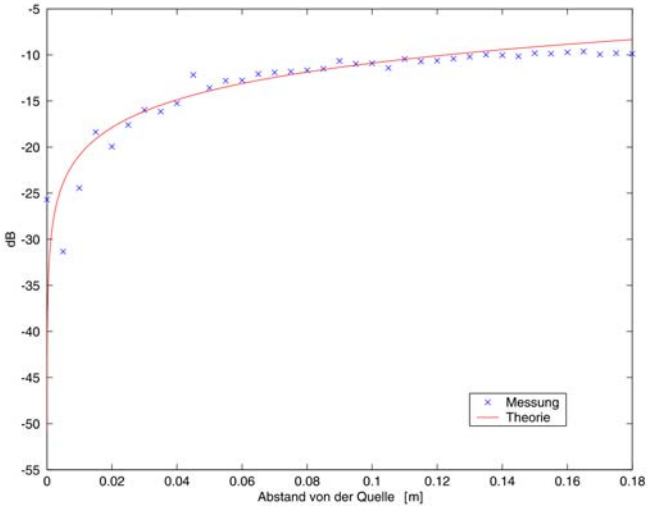

Abbildung 2: Zunahme der ersten Harmonischen mit dem Abstand, relativ zur Grundfrequenz. Theorie: Gl. (1).

Erzeugung von Audio-Schall

Wird nun auf den Schallwander ein amplitudenmoduliertes Signal gegeben, z.B. 77 kHz Trägerfrequenz mit Modulationsfrequenzen von ca. 1 bis 10 kHz und einem Modulationsgrad von rd. 70 %, so hört man den Audioschall aufgrund der (näherungsweise) quadratischen „Kennlinie“ der Luft. Der Audioschall wird fast mit der gleichen Richtwirkung abgestrahlt wie der erzeugende Ultraschall. Diese Tatsache macht die parametrische Schallerzeugung für Anwendungen in der Messtechnik interessant.

Abb. 3 zeigt die gemessene Richtcharakteristik des demonstrierten Ultraschallwandlers bei 80 kHz, aufgenommen in 1.5 m Entfernung im reflexionsarmen Raum. Zum Vergleich ist die berechnete Richtcharakteristik unter Annahme eines Kolbenstrahlers mit aufgeführt und auch die berechnete für die Audiofrequenzen 6 und 9 kHz, falls diese vom Wandler selber (als Kolbenstrahler) abgestrahlt würden. Erzeugt demnach der Wandler aufgrund einer eigenen nichtlinearen Kennlinie Audioschall, würde dieser eher kugelförmig abgestrahlt werden (wie aufgrund der Abstrahlfläche im Vergleich zur Wellenlänge auch zu erwarten ist).

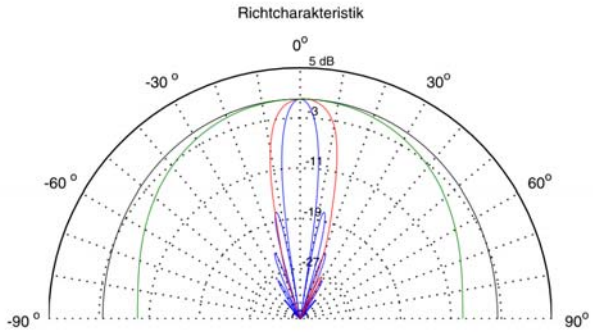

Abbildung 3: Gemessene und berechnete Richtcharakteristik des Ultraschallwandlers (Berechnung als Kolbenstrahler). Innere Kurve (blau): Berechnet für 80 kHz. Nächste innere Kurve (rot): Gemessen bei 80 kHz. Zweitäußere Kurve (grün): Berechnet für 9 kHz. Äußere Kurve (schwarz, fast kreisrund): Berechnet für 6 kHz.

Tatsächlich wird als Richtcharakteristik für den Audioschall jedoch gemessen (Abb. 4):

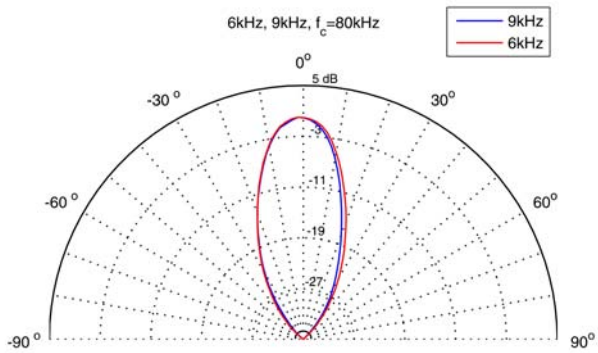

Abbildung 4: Gemessene Richtcharakteristik für 6 und 9 kHz bei Abstrahlung eines entsprechend modulierten 80 kHz Trägersignals

Der Vergleich von Abb. 4 mit Abb. 3 zeigt, dass der Audioschall im wesentlichen mit der gleichen Richtcharakteristik abgestrahlt wird wie der Ultraschall.

Wie kann man die Generierung des Audioschalls während der Wellenausbreitung des Ultraschalls verdeutlichen? Dazu wird folgendes einfaches Experiment durchgeführt (Abb. 5): Der Schallsender und das Mikrofon sind in rd. 2 m festem Abstand aufgestellt. Der Wandler strahlt die modulierte Ultraschallwelle ab. Das Mikrofon empfängt „gefiltert“ Audioschall, indem die Mikrofonmembran senkrecht zur Wellenfront des Ultraschalls gestellt wird. Außerdem befindet sich in der Signalaufbereitung des Mikrofonsignals ein Tiefpass mit 10 kHz Grenzfrequenz. Jetzt wird eine für Ultraschall undurchlässige Plastikfolie vor den Ultraschall-

wandler gehalten. Die Plastikfolie ist jedoch für Audioschall durchlässig.

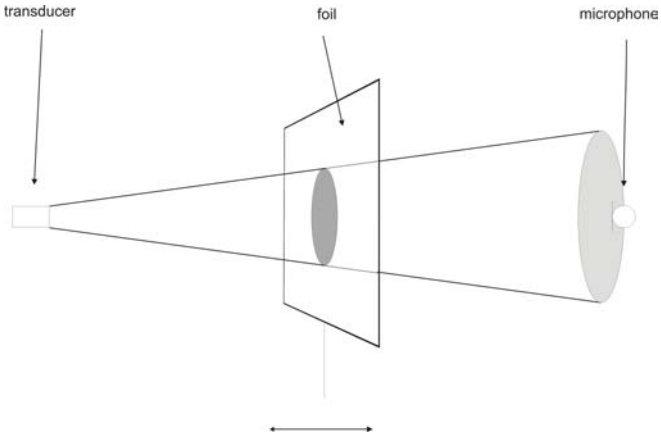

Abbildung 5: Skizze des Aufbaus zur Demonstration, dass der Audioschall im Volumen zwischen Wandler (links) und beweglicher Folie (Mitte) erzeugt wird. Das Volumen der Ultraschallabstrahlung wird durch den Kegel veranschaulicht.

Wenn die Plastikfolie nun auf dem Weg vom Sender zum Mikrofon bewegt wird, sieht man unmittelbar die Zunahme des Audioschalls, der offensichtlich im Volumen zwischen Wandler und Folie erzeugt wird. Quantitativ ergibt sich das Ergebnis in Abb. 6.

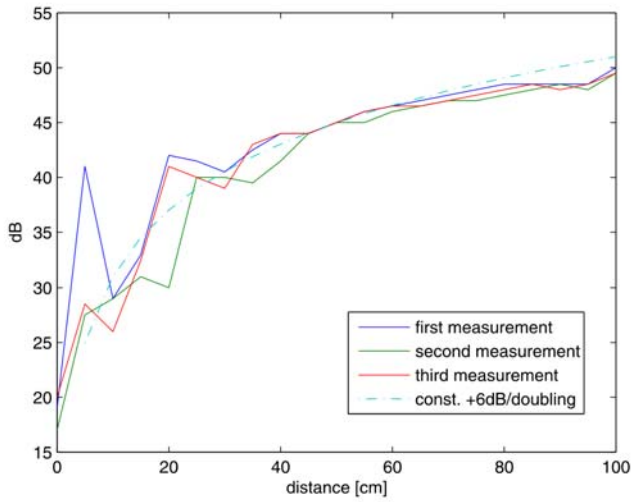

Abbildung 6: Lineare Zunahme des Audioschalldrucks mit (näherungsweise) linearer Zunahme des Wechselwirkungsabstandes durch Bewegen der Folie in Abb. 5 nach rechts. Drei Messkurven: Schwankungen entstehen aufgrund des niedrigen Störabstands bei dieser Demonstrationsmessung.

Wie in [3] gezeigt wird, nimmt der Audioschall proportional zum Wechselwirkungsvolumen V und quadratisch mit der Modulationsfrequenz zu. (siehe auch [4]):

$$p_{audio} \propto V \cdot (\gamma - 1) \cdot \Delta\omega^2 \cdot p^2 \qquad (4)$$

Da V in Gl (4) mit der Entfernung kubisch zunimmt und p aber linear abnimmt, ist zu erwarten, dass der Hörschall nach Gl. (4) mit der Entfernung linear zunimmt. In Gl. (4) ist $\Delta\omega$ die Differenzfrequenz zwischen je zwei Primärsignalen (hier also die Modulationsfrequenz). Auch diese Gesetzmäßigkeit ist in der betrachteten Anordnung erfüllt, wie Abb. 7 zeigt.

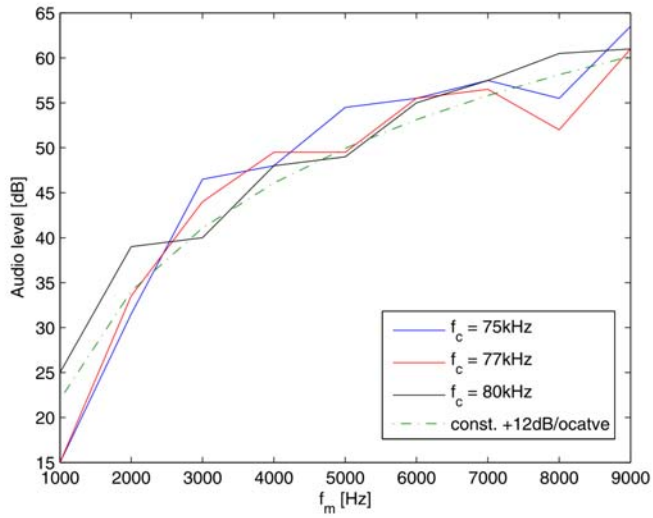

Abbildung 7: Quadratische Zunahme des Audiopegels mit der Frequenz (gemessen für drei Trägerfrequenzen).

Bekannte Anwendungen

Die parametrische Erzeugung von Schall durch die Nichtlinearität des Ausbreitungsmediums ist lange bekannt und wird messtechnisch insbesondere im Unterwasserschall genutzt. Für Luftschall wurde 1983 unter der treffenden Bezeichnung „Audio Spotlight“ die Idee zur Verwendung als Lautsprecher publiziert [5]. Tatsächlich technisch realisiert wurde das Konzept von Sennheiser [6]. Der von Sennheiser produzierte AudioBeam© wird beworben, um in verschiedenen Umgebungsbedingungen das Ohr des Hörers ohne Störung Außenstehender ansprechen zu können (z.B. in Museen). Eine sehr interessante Anwendung wird derzeit an der Universität Oldenburg von der Gruppe Kohärente Optik (Prof. Hinsch) entwickelt. Eine AudioBeam© -Variante soll gezielt auf alte Bilder und Fresken gerichtet werden, um die Oberflächenstruktur vorsichtig zu Schwingungen anzuregen. Diese Schwingungen werden dann laserinterferometrisch detektiert, um daraus den Handlungsbedarf zur Restauration wertvoller Kunstwerke ableiten zu können [7].

Erstmals als Anwendung zur Bestimmung des Reflexionsfaktors eines akustischen Materials wurde der parametrische Luftschallwandler von Zakharia u.a. auf der CFA/ DAGA’04 in Strassburg vorgestellt [8].

In situ Messung des Reflexionsfaktors

In Weiterführung der o.g. Vorschläge kann das Verfahren mit einigen Vorteilen zur Messung des winkelabhängigen Reflexionsfaktors von Materialien in situ verwendet werden, d.h. es kann die akustische Eigenschaft von Oberflächen untersucht werden, die z.B. für eine akustische Maßnahme bereits montiert sind. Die Vorteile liegen in der hohen Richtwirkung, die eine gezielte „Beleuchtung“ der zu untersuchenden Oberfläche gestattet und die eine gute geometrische Trennung des reflektierten Signals von dem außerhalb der Hauptkeule liegenden Direktsignal ermöglicht

(Abb. 8 und 9). Allerdings sind noch eine ganze Reihe von Problemen zu lösen, um eine zufriedenstellende Anwendung zu erreichen.

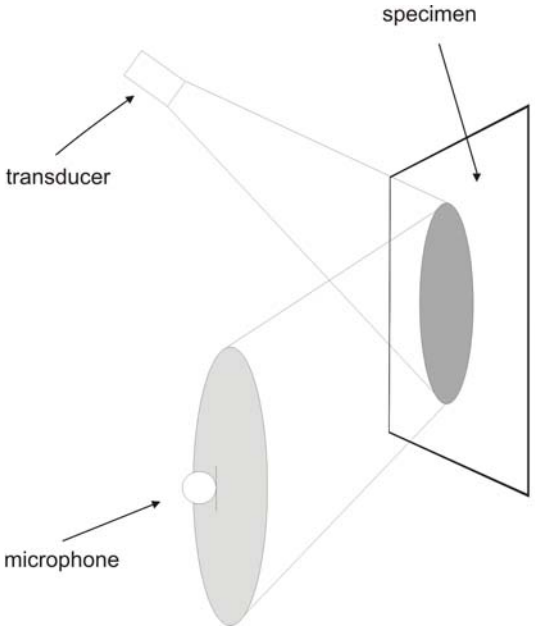

Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau für eine winkelabhängige Messung des Reflexionsfaktors (bzw. der Impedanz)

Die geometrische Trennung von Direktsignal und Rückwurf gelingt selbstverständlich nur für einen endlichen Winkelbereich (siehe z.B. Abb. 9).

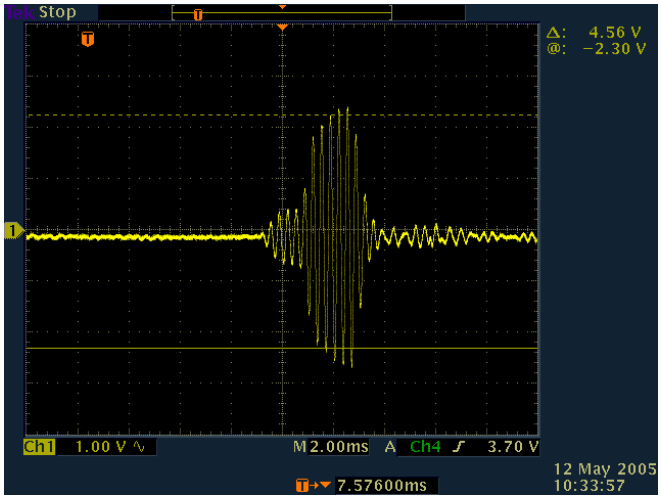

Abbildung 9: Screenshot des Demonstrationsversuchs aus Abb. 8. Das Direktsignal (kleiner Anfangspuls) ist deutlich gegenüber dem Rückwurf (großer Puls) unterdrückt. Der Winkel der Reflexion ist 45°, die Entfernung Wandler/ Mikrofon zum Panel rd. 1.5 m, die „beleuchtete" (elliptische) Fläche rd. 1 x 2 m^2.

Auf der „beleuchteten" Fläche strahlen alle Elementarstrahler auf den infinitesimalen Flächenelementen mit einer Charakteristik, die von der eingestrahlten Wellenfront abhängig ist. Analytische Lösungen sind für Anregung mit ebenen Wellen, Kugelwellen oder Dipolstrahlung bekannt. Es ist zu prüfen, wie nun die Wellenfront des „Audio Spotlight" zweckmäßig zu beschreiben ist.

Das schwerwiegendste Problem für die reale Anwendung dieser neuen in situ Messmethode zeigt Gl. (4) auf:

Der Audioschall nimmt quadratisch mit der Differenzfrequenz, also der Messfrequenz ab. Jedoch ist das Verfahren gerade für tiefe Frequenzen interessant, bei deren eine gerichtete Abstrahlung zur Untersuchung einer begrenzten Materialoberfläche erforderlich ist.

Es muss daher in weiteren Untersuchungen gefunden werden, wie die anderen Variablen in Gl. (4) soweit zu erhöhen sind, dass der Audioschall bei der Messung hinreichenden Störabstand aufweist.

Zusammenfassung

Bei hohem Schalldruck (im vorliegenden Experiment 130 dB) bewirkt die nichtlineare Zustandsgleichung der Luft eine Verzerrung der Schallwellen. Besonders deutlich tritt dabei die erste Harmonische hervor, insbesondere wenn das Volumen hohen Schalldrucks durch eine gebündelte Abstrahlung begrenzt ist. Bei mehreren Frequenzen werden Differenzfrequenzen generiert, die z.B. für Ultraschallsignale im Hörbereich liegen können. Die starke Richtcharakteristik der Ultraschallabstrahlung kann genutzt werden, um auch den Audioschall gerichtet abzustrahlen. Derartige Lautsprecher haben aber den Nachteil, dass die Wiedergabe der Tiefen quadratisch mit der Frequenz abnimmt. Die hohe Richtwirkung ist dagegen von Vorteil und ermöglicht die Bestimmung des Reflexionsfaktors bzw. der Impedanz einer endlich begrenzten Oberfläche unter verschiedenen Schalleinfallswinkeln. Dies ist besonders für Materialuntersuchungen in situ interessant, bei denen störende Reflexionen und Randeffekte zu vermeiden sind.

Literatur

[1] Reference to AIRMAR Technology Corperation
`www.airmar.com`

[2] The Physics of Ultrasound. V. A. Sutilov. Springer Verlag, 1984

[3] H. O. Berktay, Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications, J. Sound and Vibration, **2** (1965), 435-461

[4] V. Mellert, B. Schwarz-Röhr, The origin of the audio signal in a beam of modulated ultrasound in air. CFA/ DAGA '04, Strasbourg 2004

[5] M. Yoneyama, J. Fujiomoto, The Audio Spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design, J. Acoust. Soc. Amer., **73** (1983), 1532-1536.

[6] Reference to Sennheiser
`www.sennheiser.com/ sennheiser/icm_eng.nsf/root/09859`

[7] Reference to Prof. Hinsch
`www.physik.uni-oldenburg.de/holo/12701.html`

[8] S. Hibral, M. Zakharia, In situ characterisation of materials using parametric sonar. CFA/ DAGA '04, Strasbourg 2004