

# Hocheffektive breitbandige Ultraschallwandler

Vladimir Gorelik

Sennheiser electronic GmbH & Co. KG; Email: [gorelikv@sennheiser.com](mailto:gorelikv@sennheiser.com)

## Einleitung

Ultraschallstrahler finden Anwendung in Bewegungs- und Abstandssensoren, Anemometer, Flow-meter, in sogenannten parametrischen Lautsprechern (AudioBeam) [1] u.s.w.. In allen diesen Anwendungen erwartet man vom Strahler neben einen guten Richtwirkung hohe Effektivität, d.h. hohen erreichbaren Schalldruck. Bei den Abstandssensoren und dem Flow-meter bestimmt die Breitbandigkeit der Wandler deren Genauigkeit.

Vor vielen Jahren wurden bei Sennheiser elektrostatische Ultraschallwandler für Fernbedienungen entwickelt und produziert. Altes know-how diente uns als Grundlage für die Entwicklung großflächiger und hocheffektiver Ultraschallstrahler, vor allem für AudioBeam-Anwendungen. In dem vorliegenden Vortrag werden die Untersuchungsergebnisse diskutiert.

## Grundlagen

Ein in einer unendlichen, starren Wand schwingender Kolbenstrahler mit dem Radius  $a$  und der Schnelle  $v$  erzeugt in einem bestimmten Abstand  $r$  auf seiner Achse den Schalldruck, der durch die folgende Gleichung [2] gegeben ist:

$$|p| = 2\rho cv \left| \sin \left[ \frac{k}{2} \left( \sqrt{r^2 + a^2} - r \right) \right] \right| \quad (1)$$

Sinngemäß betrachten wir hier den Betrag des Schalldruckes. Der nach (1) berechnete Schalldruckverlauf in Abhängigkeit vom normiertem Abstand  $r/r_g$ , wobei  $r_g = a^2/\lambda$  dem Abstand entspricht, bei dem das letzte Maximum erreicht wird, ist in Abb. 1 dargestellt.

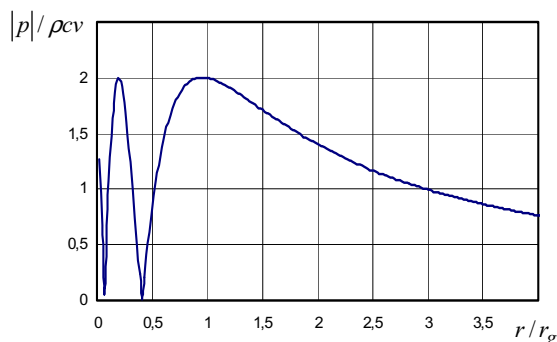


Abbildung 1: Schalldruck in der Achse eines Kolbenstrahlers

Für das Fernfeld ( $r \gg a^2/\lambda$ ) lässt sich Gleichung (1) vereinfachen

$$p = \rho cv (ka^2 / 2r) = \frac{\rho f v A}{r} \quad (2)$$

wobei  $A=2\pi a^2$  die Fläche des Kolbens ist.

Es ist jetzt leicht zu zeigen, dass das mechano-akustische System des breitbandigen Wandlers massegehemmt sein muss: tatsächlich wächst dabei die mechanische Impedanz  $Z_M$  proportional zu der Frequenz:  $Z_M = \omega m$ , und für die Schnelle gilt:  $v = F/\omega \cdot m$ , wobei  $F$  die frequenzunabhängige Coulombkraft ist. Das Einsetzen des letzten Ausdrucks in (2) zeigt, dass der Schalldruck nun unabhängig von der Frequenz ist.

Ähnlich lässt sich zeigen, dass wir bei steifigkeitsgehemmten Systemen einen mit 12 dB/Okt und bei widerstandsgehemmten Systemen einen mit 6 dB/Okt steigenden Frequenzgang des Schalldruckes hätten. Da die Impedanz der realen Systeme immer alle drei Komponenten (Masse  $m$ , Steifigkeit  $S$  oder Nachgiebigkeit  $C$  und aktiven Widerstand  $R$ ) beinhaltet, hat der Frequenzgang des Wandlers immer drei - mehr oder weniger eindeutig erkennbare - Bereiche (vgl. Abb.2). Bei tiefen Frequenzen, für die gilt  $Z_M = 1/\omega \cdot C \gg \omega \cdot m$ , steigt der Frequenzgang mit 12 dB/Okt an.

Bei höheren Frequenzen, wo gilt  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$ , verläuft der Frequenzgang horizontal. Im kurzen Übergangsbereich, wo die reaktiven Impedanzkomponenten sich gegenseitig kompensieren, beobachten wir einen Frequenzgananstieg von 6 dB/Okt.

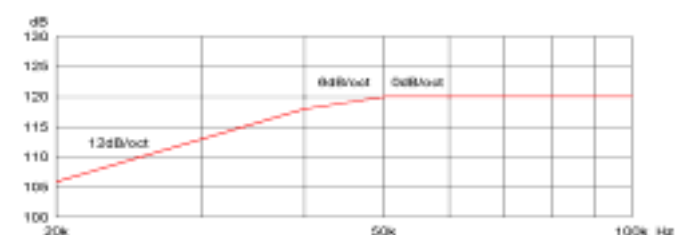


Abbildung 2: Typischer Frequenzgang des Ultraschallwandlers

Bei der Entwicklung eines breitbandigen Strahlers muß folglich die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems an der unteren Grenze des gewünschten Frequenzbereiches liegen. Da die Resonanzfrequenz durch das Produkt  $m \cdot C$  bestimmt wird, haben wir dementsprechend eine gewisse Freiheit in der Auswahl von Masse und Nachgiebigkeit. Offensichtlich soll die Nachgiebigkeit des Systems möglichst groß sein, weil nur in diesem Fall die Bedingung  $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$  bei minimaler Masse  $m$  erfüllt werden kann. Für ein massegehemmtes System muss also nicht die Masseimpedanz groß sein, sondern die Steifigkeitskomponente möglichst klein sein. Nur so können wir hohe Schnelle und letztendlich hohen Schalldruck erreichen.

An dieser Stelle müssen wir noch die Frage der mechanischen Stabilität der Membran betrachten. Die Coulombkräfte zwischen Gegenelektrode und Membran, die letztere in Bewegung bringen, sind sehr schwach und vermindern sich mit dem Quadrat des Luftspaltes. Aus diesem Grund muss der Luftspalt möglichst klein sein. Hohe Schalldrücke erreicht man außerdem nur bei ausreichend großer schwingender Fläche der Membran. Diese zwei Forderungen (für einen breitbandigen Wandler auch die Forderung an möglichst kleine Steifigkeit des Systems) widersprechen einander, da eine großflächige Membran von der Gegenelektrode angezogen werden kann und dabei die Fähigkeit zum Schwingen (und folglich zum Strahlen) verliert. Bei den bekannten elektrostatischen Ultraschallwandlern löst man das Problem mit Hilfe von unterstützenden Elementen an der inneren Oberfläche der Gegenelektrode. Als solche können Stege oder Säulen dienen [3] [4] [5]. Verbreitet sind auch Ultraschallwandler, bei denen die Membran direkt auf der aufgerauhten Oberfläche der Gegenelektrode liegt [6] [7]. In allen diesen Fällen ist die Membran in viele kleine strahlende Zonen unterteilt. Durch die erhöhte mechanische Stabilität können solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisations- und Signalspannungen arbeiten. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

## Konstruktive Ausführung der Wandler und elektroakustische Parameter

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele:

- minimal mögliche Verluste an der schwingungsfähigen Membranfläche, bedingt durch die Unterstützungsstruktur und
- möglichst ganzflächige effektive Anregung der Membran.

Einen Aufbau des Ultraschallwandlers, der alle oben formulierten Forderungen am ehesten erfüllt, wurde in [5] beschrieben. Bei diesem Multi-Support-Wandler stützt sich die Membran auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der fein perforierten Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran. Da die Gegenelektrode perforiert ist, spielt die Steifigkeit der Luft zwischen Membran und Gegenelektrode keine Rolle mehr. Die Gesamtsteifigkeit des Systems ist dabei nur durch die Membransteifigkeit bestimmt und kann so klein sein, dass das System schon ab 40 kHz als massegehemmtes System gebaut werden kann.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass durch die präzise Prägung der Gegenelektrode (siehe Abb.3) der Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfacht (die Notwendigkeit der Distanzscheibchen entfällt), sondern auch sein Wirkungsgrad erheblich erhöht werden kann. Die metallisierte Kunststoffmembran liegt dabei direkt auf den Erhebungen der Gegenelektrode auf.

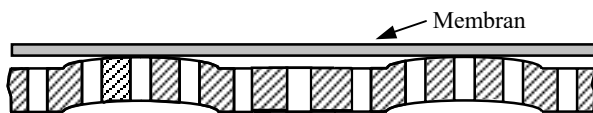


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau des Wandlers mit geprägter Gegenelektrode

Die konstruktive Ausführung eines kleinen Wandlers mit dem Durchmesser 14,5 mm und Höhe 4,7 mm ist auf Abb. 4 zu sehen. Abb. 5 zeigt seine Frequenzgänge (20 kHz–200 kHz), aufgenommen mit B&K Messmikrofon 4138 ohne Schutzgitter. Gemessen wurde in 10cm Abstand bei 200V Polarisationsspannung und 120V<sub>p</sub> Signalspannung. Die effektive strahlende Fläche des Wandlers beträgt 0,93 cm<sup>2</sup>; die Wandlerkapazität liegt bei ca. 60 pF.



Abbildung 4: Miniaturwandler

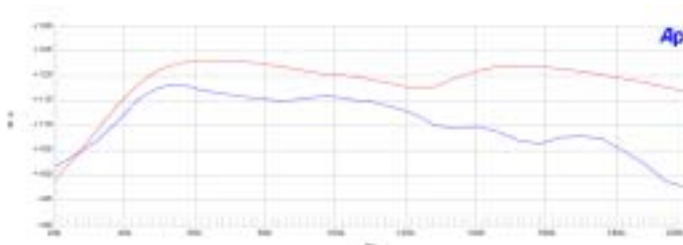


Abbildung 5: Amplitudenfrequenzgang [SPL] des Miniaturwandlers

Die obere Kurve repräsentiert einen Wandler ohne Lochgitter. Der in der Abb. 2 gezeigte typische Frequenzgangverlauf ist bei dieser Kurve gut erkennbar. Der erreichbare Schallpegel liegt über 120 dB SPL. Die untere Kurve wurde mit Lochgitter, wie in Abbildung 4 gezeigt, gemessen.

Da für viele Anwendungen ein breitbandiger Empfänger notwendig ist, wurde auch ein entsprechendes Elektretmikrofon entwickelt. Die Empfindlichkeit des Mikrofons beträgt ca. 1mV/Pa, seinen Frequenzgang zeigt Abb. 6. Die effektive Rauschspannung in dem Frequenzbereich 10 Hz – 200 kHz beträgt weniger als 8  $\mu$ V, im Ultraschallbereich von 20 kHz bis 200 kHz liegt diese Spannung unter 4  $\mu$ V. Bezogen auf 94 dB SPL beträgt der Rauschabstand dann entsprechend 42 dB und 48 dB.

Für dieses Mikrofon wurde das gleiche Gehäuse benutzt, wie in Abb. 4 gezeigt ist.

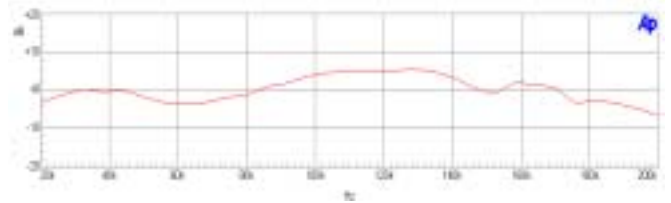


Abbildung 6: Amplitudenfrequenzgang des Mikrofons

Die neu entwickelte Prägungstechnologie erlaubt präzise und optimale Formgestaltung der Gegenelektrode nicht nur für kleine,



Abbildung 7: Großflächiger elektrostatischer Wandler

sondern auch für großflächige (bis DIN A3) Wandler. Für Audio-Beam-Anwendungen [1] wurden Wandler in der Größe 182x289 mm hergestellt. Die oben angegebenen Daten und Formel (2) erlauben praktisch für beliebige Wandlergrößen, den Schalldruck im Fernfeld zu berechnen.

Selbstverständlich lassen sich z. B. auch zylindrisch gewölbte Wandler in dieser Technik herstellen. Das könnte in Fällen vorteilhaft sein, in denen die sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

Auf die Darstellung der Richtdiagramme wurde an dieser Stelle bewusst verzichtet. Aus der Wandlergeometrie und den Wellenlängenbeziehungen lassen sie sich leicht berechnen.

Abschließend möchten wir hervorheben, dass erstmals ein optimiertes und aufeinander abgestimmtes breitbandiges Wandlerpaar (Sender und Empfänger) angeboten werden kann, das ideale Voraussetzungen für zahlreiche neue Anwendungen eröffnet.

<sup>1</sup> Neue Möglichkeit der Schallwiedergabe. rfe 1-2/00

<sup>2</sup> E. Skudrzyk, Die Grundlagen der Akustik. Wien, Springer-Verlag 1954

<sup>3</sup> L. Pizarro, D. Certon, M. Lethiecq, O. Boumatar, B. Hosten, Experimental Investigation of Electrostatic Ultrasonic Transducers with Grooved Backplates. 1997 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM – 1003

<sup>4</sup> Michael J. Anderson and James A. Hill, Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995

<sup>5</sup> H.-J. Griese, Wandler für Ultraschall-Fernsteuerungen. Funkschau 1973, Heft 9

<sup>6</sup> H. Sell, Eine neue kapazitive Methode zur Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und umgekehrt. Zeitschr. f. techn. Physik, Nr.1(1937), 3-10

<sup>7</sup> W. Kuhl, G. R. Schodder, and F.-K. Schröder, Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonic. Acustica 1954, No. 5