

Ein Miniaturkunstkopf für binaurale Raumsimulation mittels eines verkleinerten raumakustischen Modells im Maßstab 1:10

NING XIANG

(Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Akustik Ruhr-Universität Bochum, D-4630 Bochum 1)

Einleitung

Das binaurale Hören des Menschen spielt eine entscheidende Rolle bei der Qualitätsbeurteilung der Akustik von Räumen. Deshalb wird der Funktionsweise der menschlichen Ohren bei der Vorausbestimmung der akustischen Eigenschaften eines Zuhörerraums insofern Rechnung getragen, als versucht wird, ein "Hineinhören mit zwei Ohren" in den geplanten Raum zu ermöglichen. Die Bereitstellung dieser akustischen Umgebung wird als **binaurale Raumsimulation** bezeichnet. Binaurale Raumsimulation mittels eines verkleinerten raumakustischen Modells soll die Nachbildung der menschlichen Außenohrübertragungseigenschaften (AOÜE) ins Modell hineinbringen. Dies läßt sich durch einen maßstabsgerecht aufgebauten Miniaturkunstkopf (Mini-Kopf) verwirklichen. So hat Els (1984) /1/ zu diesem Zweck einen Mini-Kopf mit verkleinerten Ohrmuscheln für 1:10 Modelle entwickelt. Leider wurden damals die Probleme des Mini-Kopfs hinsichtlich der Außenohrgeometrie und der Empfindlichkeit sowie der Bandbreite nicht zufriedenstellend gelöst. Außerdem war die gewählte Methode der Nachbildung von verkleinerten Ohrmuscheln recht aufwendig. Seither ist der zehnfach verkleinerte Kunstkopf weiterentwickelt worden. Über die neuesten Ergebnisse der Entwicklung des Mini-Kopfs wird im folgenden berichtet.

Aufbau des Miniaturkunstkopfs

Um möglichst die naturgetreuen Übertragungseigenschaften zu erzielen, die ein menschliches Außenohr besitzt, soll der Mini-Kopf die Außenohrgeometrie maßstabsgerecht nachbilden und ein entsprechendes Mikrofonsystem enthalten. Anforderungen an den Mini-Kopf sind:

- Genaue Außenohrgeometrie für Nachbildung möglichst naturgetreuer AOÜE;
- Gute Reproduzierbarkeit bei der Herstellung weiterer Mini-Köpfe;
- Genügende Bandbreite für Musikdarbietung und "richtiges" binaurales Hören;
- Hohe Empfindlichkeit für großen Störabstand in Messungen.

Als die AOÜE wesentlich beeinflussender Körperteil kann der Torso (einschl. des Kopfs) der "typischen" Versuchsperson relativ einfach mit hinreichend guter Reproduzierbarkeit verkleinert werden. Auf die Position des Gehöreingangs muß vielmehr besonders geachtet werden, da sie bei der Bestimmung der AOÜE sehr bedeutsam ist /2/. Silikon-Kautschuk wird für den Abguß des Torsos verwendet. Erhebliche Schwierigkeiten bereitet jedoch die Verkleinerung der Ohrmuschel im Maßstab 1:10. Zur Lösung dieser Probleme hat Els /3/ ein Paar aus verkleinerten Scheiben zusammengesetzte Ohrmuscheln angefertigt. Seine Methode zur Verkleinerung war jedoch sehr aufwendig, außerdem bietet die Anfertigungstechnik keine Gewähr für eine

zufriedenstellenden Reproduzierbarkeit. Um die Verkleinerung der Ohrmuschel stark zu vereinfachen und die Reproduzierbarkeit der Bearbeitung zu gewährleisten, haben wir ein Paar Gußformen aus Els' Scheibenmuscheln entwickelt. So können nun zwei maßstabsgerecht verkleinerte Ohrmuscheln ohne Schwierigkeiten in Kunststoff (Polyesterharz) gegossen werden. Eine Vielzahl von Vergleichsmessungen hat eine akzeptable Genauigkeit der Verkleinerung bestätigt /4/. Bild 1 (rechts) stellt die zwei verkleinerten Gußohrmuscheln fotografisch dar. Angesichts der zu erzielenden Bandbreite (bis 160 kHz) und der gegebenen Halsgröße sind zwei Achtzoll-Mikrofone (B & K 4138) im Kopf und Oberkörper installiert. Durch Optimierung des Kupplers zwischen Ohrkanaleingang und Mikrofonmembran stellt sich heraus, daß ein Sondenröhrchen (0.8 mm Durchmesser, ca. 4 mm Länge) mit einem Kupplervolumen vor der Membran (3.2 mm Durchmesser, 0.1 mm Höhe) die beste Lösung ist. Diese Konstruktion erlaubt möglichst geringe Reduzierung der Mikrofonempfindlichkeit und beeinträchtigt die Bandbreite des Mikrofons unwesentlich. Das Mini-Kopf-Mikrofonsystem kann dann breitbandige Messungen bis zu 160 kHz gewährleisten. Bild 1 (links) zeigt die Ansicht des Mini-Kopfs.

Entzerrung

Unter der Annahme, daß die Außenohrgeometrie maßstabsgerecht verkleinert ist, kann die "falsche" Gehöreingangsimpedanz des Mini-Kopfs durch ein Zweipol-Filter, bestimmt für eine Richtung im Freifeld, entzerrt werden /5/. Bild 2 veranschaulicht die Bestimmung dieser Entzerrungsfunktion, wobei eine "typische" Versuchsperson herangezogen werden soll. Speziell für den Mini-Kopf muß eine Frequenztransformation zwischen Audio- und Modellfrequenzbereich zwischengeschaltet werden. Die Überlegung geschieht im Frequenzbereich für Freifeldbeschallung und geht von den gleichen Ohrsignalen $P_e(f) = P'_e(f)$ zwischen Situation (a) und (c) in Bild 2 aus, wobei

$$P_e(f) = U(f)H_{sa}(f)H_p(\phi, \delta, f)H_{ec}(z_T, f), \quad (1)$$

$$P'_e(f) = U(f')H_{sa}^M(f')H_p^M(\phi, \delta, f')H_{ec}^M(z_T^M, f')H_{rec}(f')E(f)H_{rep}(f)H_{hp}(z_T, f). \quad (2)$$

Einzelne Definitionen von $H(\cdot)$ -Funktionen sowie von Variablen sind aus Bild 2 ersichtlich (siehe /4/ für Einzelheiten). Hier sind die Frequenzen f und f' in unterschiedlichen Bereichen definiert und zwar $f' = 10f$. Die "Frequenztransformation" wird vorläufig außer acht gelassen, sie wird erst später berücksichtigt. Unter der Annahme, daß die elektrischen Eingangssignale beider Schallquellen $U(f) = U(f')$ identisch sind, kann die Entzerrungsfunktion $E(f)$ bei Festlegung einer Bezugs-Einfallrichtung ϕ_0, δ_0 bestimmt werden (siehe auch /3/, /4/):

$$E(f) = \frac{H_{sa}(f)H_p(\phi_0, \delta_0, f)H_{ec}(z_T, f)}{H_{hp}(z_T, f)H_{rep}(f)} \frac{1}{H_{sa}^M(f')H_p^M(\phi_0, \delta_0, f')H_{ec}^M(z_T^M, f')H_{rec}(f')}. \quad (3)$$

Offensichtlich bleibt Gl. (3) nur sinnvoll, wenn keine Null-Stellen in den Nennern auftreten. Gl. (3) drückt eine Trennung zwischen Audio- und Modellfrequenzbereich deutlich aus. Der erste oder zweite Faktor in Gl. (3) stellt jeweils eine Funktion von f (im Audiofrequenzbereich) oder f' (im Modellfrequenzbereich) dar. Zur Bestimmung von $E(f)$ ist die Richtung "Oben"

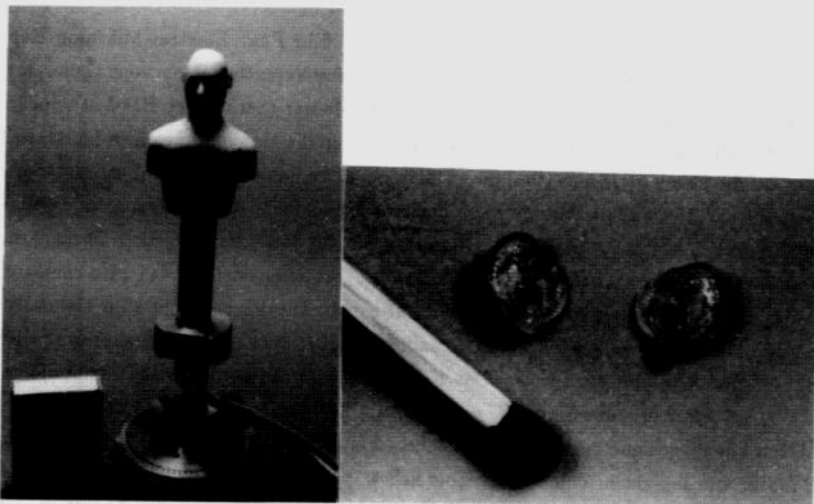


Bild 1: Miniaturkunstkopf für binaurale Auswertung in 1:10 Modellen und maßstabsgerecht verkleinerte Gußohrmuschel, Links: Ansicht des Miniaturkunstkopfs; Rechts: verkleinerte Gußohrmuschel im Größenvergleich.

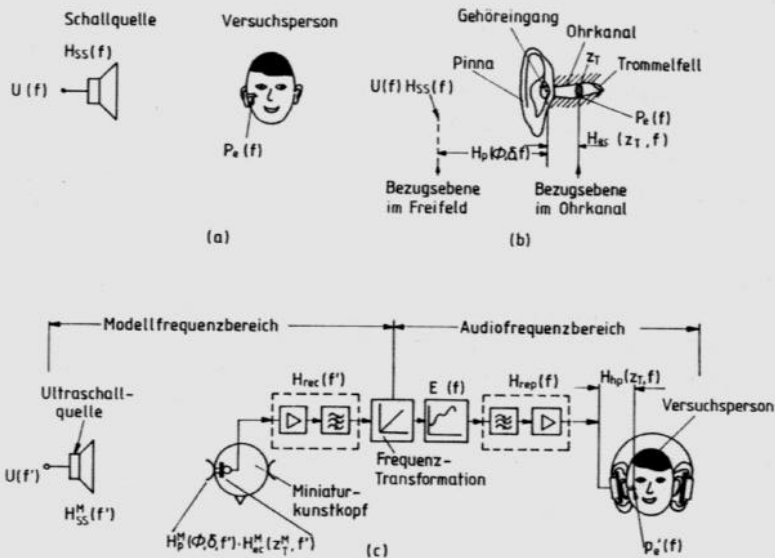


Bild 2: Normales Hören und das elektroakustische (Kunstkopf-Kopfhörer) System für genaue Nachbildung von Hörereignissen. (a) normales Hören; (b) Ohrmuschel und Ohrkanal im einzelnen; (c) Elektroakustische Übertragungskette für Nachbildung der Situation in (a).

($\phi_0 = 0^\circ, \delta = 90^\circ$) als Bezugsrichtung gewählt /4/. Ein Paar Elektret-Mikrofon-Kapseln (Sennheiser KE-4-211) wurde in beide Gehörgängen der Versuchsperson vom Gehöreingang 4 mm tief hinein eingesetzt. Ein hochwertiger Kopfhörer (Sennheiser HD 540) wurde zur Messung sowie zum späteren Abhören verwendet. Durch die Beschallung eines Lautsprechers in bezug auf die Beschallung des Kopfhörers kann der erste Faktor in Gl. (3) bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Mikrofonkapseln in Gehörgängen beim Aufsetzen des Kopfhörers festgehalten werden müssen. Die Abtastfrequenz betrug 44.1 kHz für jeden Ohrkanal. Zur Bestimmung des zweiten Faktors in Gl. (3) war die Abtastfrequenz auf 441 kHz einzustellen. Diese Messung geschieht ausschließlich am Mini-Kopf. Die Beschallung kam ebenfalls von "oben" durch einen speziell entwickelten Schallsender /6/, der den Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 160 kHz abdecken kann. Das Korrelationsverfahren mit einer Maximalfolge der Länge $2^{13} - 1$ als Anregungssignal /7/ wurde für die oben genannten Messungen verwendet. Nach einem geeigneten Abschneiden aller digitalen Meßergebnisse im Zeitbereich auf 512 Punkte, wurden sie in den Frequenzbereich transformiert. Da die Ergebnisse für den ersten und zweiten Faktor in Gl. (3) mit Hilfe des festen Verhältnisses der Abtastfrequenzen (also $f' = 10f$) ausgewertet sind, können die beiden zur Bestimmung von $E(f)$ unmittelbar multipliziert werden, was die "Frequenztransformation" bereits impliziert /4/. Der Mini-Kopf wird in 1:10 Modellen zur Messung binauraler Raumimpulsantworten (RIA) verwendet. Mit dem Korrelationsverfahren /7/ bei der Schallanregung durch einen speziell entwickelten Ultraschallsender /6/ sowie der Abtastung des Modellschallfeldes durch den Mini-Kopf kann ein Störabstand von 30 dB erzielt werden, was im Vergleich zur frühen Version einer Verbesserung von 20 dB entspricht. Da die RIA mit "trockenem" Nutzsignal gefaltet werden sollen, führt das Faltungsergebnis mit diesem Störabstand nicht zu einem verrauschten, sondern einem etwas halligeren Höreindruck beim "Abhören". Dieser "falsche" Höreindruck kann durch geeignete Manipulation der RIA korrigiert werden /4/.

Literatur

- /1/ Els, H.: *Ein Messsystem für die Raumakustische Modelltechnik*, Fortschritte der Akustik, DAGA'84, S. 383-386. /2/ Genuit, K.: *Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften*, Dissertation RWTH-Aachen, 1984. /3/ Els, H.: *Ein Meßsystem für die akustische Modelltechnik*, Report 477, Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund, Wirtschaftsverlag NW, 1986. /4/ Xiang, N.; Blauert, J.: *A Miniature Dummy Head for Binaural Evaluation of Tenth-Scale Acoustic Models*, submitted to Applied Acoustics. /5/ Hudde, H.; Schroeter, J.: *The Equalization of Artificial Heads without Exact Replication of the Ear Drum Impedance*, Acustica, 44 (1980), S.301-307. /6/ Xiang, N.: *An Ultrasonic Electroacoustic Transducer in Cylindrical Form Using Piezoelectric Polyvinylidene fluoride Films*, Procee. of Ultrasonics International 89, S. 501-506. /7/ Xiang, N.: *Ein IBM-PC-gestütztes Meßsystem für Raumimpulsantworten mittels schneller Maximalfolgen-Transformation*, Fortschritte der Akustik, DAGA'89, S.447-450.