

# UNTERSUCHUNG ZUR RÄUMLICHEN WIEDERGABEQUALITÄT MITTELS MIKROPHONARRAY ERSTELLTER KOPFBEZOGENER AUFNAHMEN

Jörg Becker \* und Markus Sapp \*\*

Institut für Elektrische Nachrichtentechnik, RWTH-Aachen

\*jetzt Ford Werke AG, Acoustic Centre Cologne, 50725 Köln,

\*\*jetzt Emagic Soft- und Hardware GmbH, Halstenbeker Weg 96, 25462 Rellingen

Tel: +49 (221) 90-31951; Fax: +49 (221) 90-35145

e-mail: akustik@ient.rwth-aachen.de

## 1 Einleitung

Für eine gehörrichtige Schallfeldaufzeichnung ist es nötig, daß das Aufzeichnungsverfahren neben der zeitlichen und tonalen auch die räumliche Information des Schallfeldes speichert. Zur gehörrichtigen Speicherung räumlicher Informationen ist die Kunstkopfmeßtechnik sicherlich das Verfahren der Wahl [4].

In diesem Beitrag wird der Ansatz eines Mikrophonarrays mit nachgeschalteter Filterbank, welcher zur Ermittlung kopfbezogener raumakustischer Parameter gute Ergebnisse liefert, aufgegriffen [5], [1]. Mit Hilfe eines Adaptionalgorithmus lassen sich, durch Optimierung von Sondenometrie und Filterbank, die Übertragungsfunktionen des Mikrophonarrays an die Übertragungsfunktionen verschiedener Kunstköpfe anpassen.

Anhand von Hörversuchen wird die Qualität dieses Aufzeichnungssystems, insbesondere im Hinblick auf seine räumliche Komponente mit der von Kunstköpfen verglichen.

## 2 Ansatz und Analyse

In Abbildung 1 wird die Projektion der geometrischen Verhältnisse auf die Horizontalebene veranschaulicht. Der Ansatz und die folgenden Gleichungen berücksichtigen jedoch die Erweiterung auf drei Dimensionen.

Zur Berechnung der ersten Mikrophonposition wird zunächst der Frequenzbereich (Terz) aus dem HRTF-Datensatz ermittelt, bei der die Richtcharakteristik des Kunstkopfes am wenigsten der einer Kugel entspricht. Die Mikrophonübertragungsfunktion am Punkte  $x, y, z$  für einen Lautsprecher im Abstand  $r_d$  unter dem Winkel  $\varphi, \vartheta$  ergibt sich zu :

$$\begin{aligned} M(f, \varphi, x, y) &= M_0(f) \cdot e^{-j \cdot k \cdot r_d} \\ &\cdot e^{-j \cdot k \cdot (x \cdot \sin(\varphi) \cos(\vartheta) + y \cdot \cos(\varphi) \cos(\vartheta))} \\ &\cdot e^{-j \cdot k \cdot (-z \cdot \sin(\vartheta))} \end{aligned} \quad (1)$$

Die Mikrophonübertragungsfunktion  $M_0$  soll im weiteren konstant zu 1 angenommen werden. In Abhängigkeit von der Position  $x, y, z$  des Mikrophones kann aus den HRTFs des Eingangsdatensatzes  $H(f, \varphi, \vartheta)$  ein Satz laufzeitkorrigierter HRTFs nach Gleichung 2 bestimmt werden.

$$H_{kor}(f_0, \varphi, \vartheta, x, y, z) = \frac{H(f_0, \varphi, \vartheta)}{M(f_0, \varphi, \vartheta, x, y, z)} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma(f_0, x, y, z) &= \left| \frac{G(\Delta\varphi, \Delta\vartheta) \cdot |H(f_0, \varphi, \vartheta)|}{G(\Delta\varphi, \Delta\vartheta) \cdot H_{kor}(f_0, \varphi, \vartheta, x, y, z)} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

mit

$$G(\Delta\varphi, \Delta\vartheta) = \int_{\Delta\varphi} \int_{\Delta\vartheta} r_d^2 \varphi \sin(\vartheta) d\varphi d\vartheta \quad (4)$$

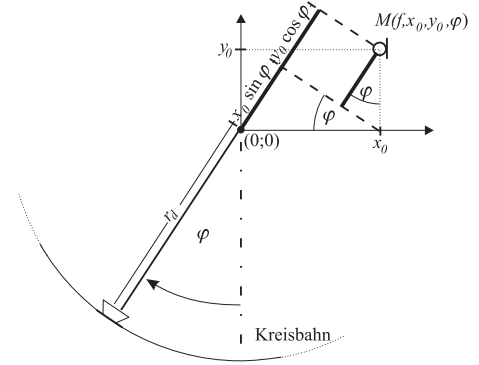


Abbildung 1: Sondengeometrie (Projektion auf die Horizontalebene)

Aus diesem Satz laufzeitkorrigierter Übertragungsfunktionen wird eine mittlere komplexe Übertragungsfunktion über alle Einfallrichtungen gebildet. Die Phasen der Übertragungsfunktionen werden hierfür abgewickelt. Die optimale Mikrophonposition ergibt sich dort, wo  $\sigma$  nach Gleichung 3 minimal wird. Im weiteren soll diese Position mit  $x_0, y_0, z_0$  bezeichnet werden.

Nach Ermittlung der Mikrophonposition kann jetzt die breitbandige Filterübertragungsfunktion  $F_i(f)$  mittels Gleichung 5 bestimmt werden. Hierzu müssen die HRTFs entsprechend dem ihnen zugeordneten Raumwinkel (Gleichung 4) gewichtet werden.

$$F_i(f) = \frac{G(\Delta\varphi, \Delta\vartheta) \cdot H(f, \varphi, \vartheta)}{M(f, \varphi, x_0, y_0, z_0)} \quad (5)$$

$$H_{neu}(f, \varphi, \vartheta) = H(f, \varphi, \vartheta) - F_i(f) \cdot M(f, \varphi, \vartheta, x_0, y_0, z_0) \quad (6)$$

Wenn Position und Filter eines Zweiges des Arrays bekannt sind, kann mit Gleichung 6 ein Satz neuer HRTFs zur Optimierung von Position und Filter weiterer Mikrophonzweige berechnet werden. Mit diesem Datensatz kann der Algorithmus erneut durchlaufen werden.

## 3 Ergebnisse

Sondengeometrie und Filterbank wurden nacheinander an die HRTFs dreier verschiedener Kunstköpfe angepaßt. Von Sonden und Kunstköpfen wurden in reflexionsfreier Umgebung Aufnahmen in 30°-Schritten mit weißem Rauschen gemacht. Diese wurden 10 Hörversuchspersonen in zufälliger Reihenfolge als Stimuli über entzerrte elektrostatische Kopfhörer dargeboten.

Der überwiegende Teil der Hörversuchspersonen war im Hören binauraler Aufnahmen trainiert. Die Aufgabe der Testpersonen bestand darin, die Schalleinfallrichtungen in einem Diagramm in der Horizontalebene und Medianebene zuzuordnen. Die Wahl der möglichen Einfallrichtungen wurde ebenfalls auf 30°-Schritte begrenzt. Abbildung

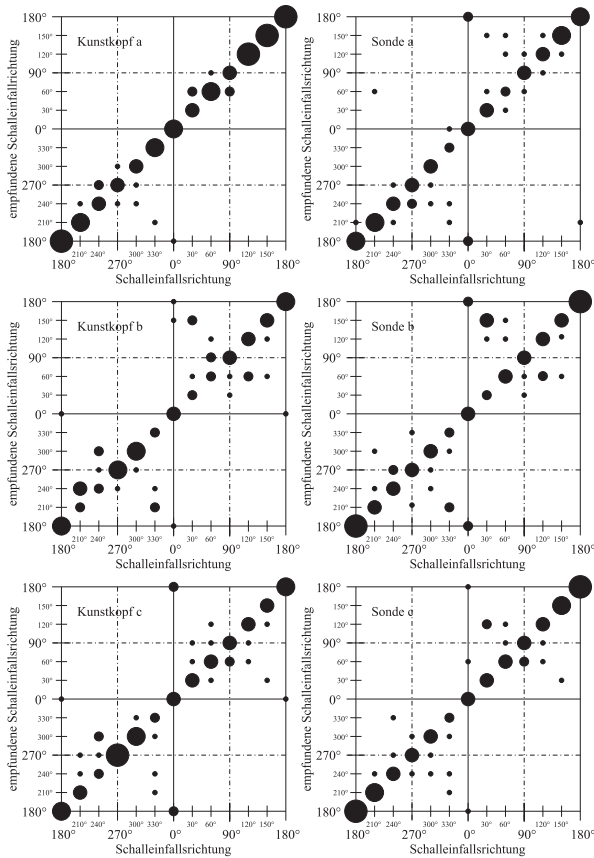


Abbildung 2: Lokalisationshörversuchsergebnisse für die Horizontalebene. Links Kunstkopf; rechts Sonde

2 zeigt das Ergebnis des Lokalisationsexperiments für die Horizontalebene. Da nur von zwei Kunstköpfen ein kompletter HRTF-Datensatz des oberen Halbraumes zur Verfügung stand, konnten die Hörversuche für die Medianebene nur mit zwei Kunstköpfen (Kunstkopf a und b) durchgeführt werden.

Die Sonde erlaubt für die Köpfe b und c in der Horizontalebene eine ähnlich gute Ortung der Schalleinfallrichtung. Die Eigenschaften des Kunstkopfes a, der in der Horizontalebene sehr gute Lokalisationsergebnisse aufweist, können durch die Sonde nicht ganz reproduziert werden.

In der Medianebene (Abbildung 3) treten bei beiden Sonden Vorne-Hinten-Inversionen auf, und das Schallereignis erscheint in der Vorne-richtung im Falle der Sonden und des Kopfes b eleviert. Die Lokalisationshörversuche sind in der Medianebene jedoch, wie meist bei Nicht-identität von Aufnahme und Abhörperson, schwierig, da hier bei der Auswertung der Richtungsinformation vom Gehör nur spektrale Unterschiede herangezogen werden können [3].

Zusätzlich wurde ein Hörversuch zur scheinbaren Schallquellenbreite (ASW) gemacht. Hierbei wurde den Hörversuchspersonen die Möglichkeit gegeben, eine Schallquelle (weißes Rauschen), welche zuvor in einem Raum mit Kunstköpfen und Sonden aufgezeichnet wurde, mittels eines akustischen Zeigers einzugrenzen [2]. Die Schallquelle wurde zudem an 3 verschiedenen Sitzpositionen (Sitzreihe 2, 5, 8) in unterschiedlichen Entfernungen (Distanz 2m, 6m, 10m) aufgezeichnet. Den Hörversuchspersonen wurde vor dem Hörversuch die zu beurteilende Größe erklärt.

Auch bei diesem Hörversuch liefern die Sonden eine gute Annäherung an die jeweiligen Kunstkopfdaten. Die Schallquellenausdehnung wurde in allen Fällen annähernd gleich empfunden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Für die gehörbezogene Aufnahme räumlicher Informationen von Schallfeldern ist die binaurale Aufnahmetechnik, insbesondere bei

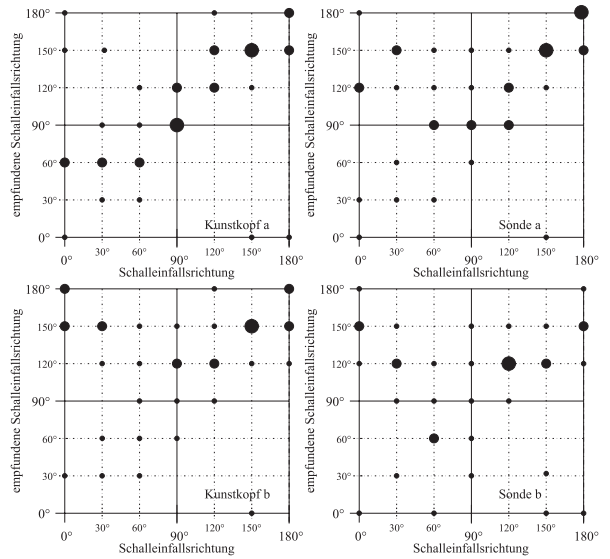


Abbildung 3: Lokalisationshörversuchsergebnisse für die Medianebene. Links Kunstkopf; rechts Sonde

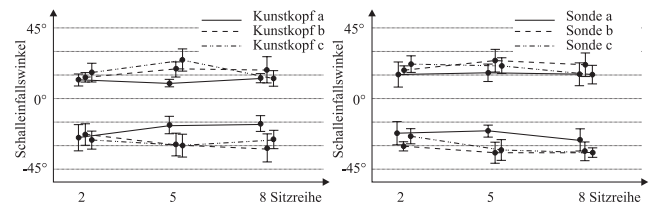


Abbildung 4: Hörversuchsergebnis für die Ermittlung der scheinbaren Schallquellenbreite (ASW). Links Kunstkopf; rechts Sonde

Identität von Aufnahme- und Abhörperson, das derzeit weitreichendste Verfahren. Kunstköpfe oder aber Ohrmikrophone lassen sich wirkungsvoll durch Mikrophonarrays ersetzen. Die Wiedergabequalität mit solchen Systemen erzeugter Aufnahmen ist in räumlicher Hinsicht annähernd mit der von Kunstköpfen vergleichbar. Um die Grenzen des Systems und die Anzahl der benötigten Mikrophone für ein Array endgültig festzulegen, sind Hörversuche mit Identität von Aufnahme- und Abhörperson notwendig. Zur Durchführung dieser Versuche müßten die HRTFs der einzelnen Hörversuchspersonen im Vorfeld aufgezeichnet werden, um Sonden-geometrie und Filterbank an diese anpassen zu können, was einen nicht unerheblichen Aufwand darstellt.

## Literatur

- [1] Jörg Becker, Matias de la Fuente und Markus Sapp. Messung kopfbezogener raumakustischer Parameter mit Mikrophonarrays. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '2000*, S. 590–591, Oldenburg, 2000. DEGA.
- [2] Jörg Becker und Markus Sapp. Synthetic soundfields for the rating of spatial perception. *Applied Acoustics*, 62: S.217–228, 2001.
- [3] Jens Blauert. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, revised edition, 1997.
- [4] Klaus Genuit. *Ein Modell zur Beschreibung von Außenohrübertragungseigenschaften*. Dissertation, RWTH, Aachen, 1984.
- [5] V. Mellert und N. Tohtuyeva. Ersatz der kopfbezogenen Schallfeldaufnahme durch eine Vielfach-Mikrophonanordnung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '98*, S. 182–183, Oldenburg, 1998. DEGA.