

## Aufbau und Optimierung eines einfachen Mikrofonarrays zur Erzeugung individueller HRTFs.

Natalia Podlaszewski<sup>1</sup>, Volker Mellert<sup>1</sup>, Steven van de Paar<sup>1</sup>, Christopher Haut<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CvO Universität Oldenburg, AG Akustik, 26129 Oldenburg, E-Mails: n.podlaszewski@uni-oldenburg.de, volker.mellert@uni-oldenburg.de, steven.van.de.paar@uni-oldenburg.de

<sup>2</sup> Schalllabor HHK GmbH, 20095 Hamburg, E-Mail: info@schalllabor-hamburg.de

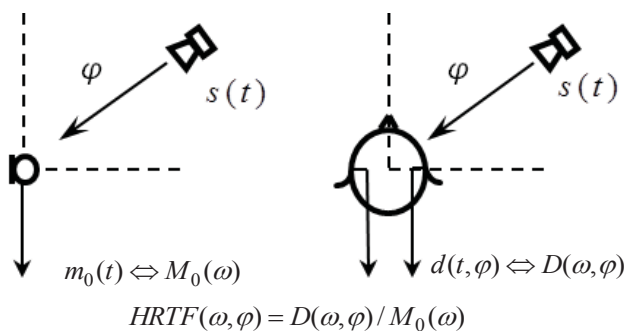
### Einleitung

Gehörliche Schallfeldaufnahmen werden näherungsweise in Kunstkopfaufnahmetechnik durchgeführt. [1] Die Substituierung eines Kunstkopfes durch ein geeignetes Mikrofonarray bietet die Möglichkeit, die individuelle kopfbezogene Übertragungsfunktion (HRTF) durch die Geometrie des Mikrofonarrays und die Filterfunktionen der Mikrofone anzupassen. Im Ergebnis besteht die Möglichkeit, die HRTF's beliebiger Kunstköpfe wie auch realer Probanden individuelle anzupassen. Ein „individualisierbares“ Mikrofonarray hat gegenüber dem geometrisch starren Kunstkopf große Vorteile für den Einsatz bei subjektiven Geräuschbeurteilungen und in der objektiven Schallmessung. Ziel dieser Untersuchung ist die Näherung vorgegebener HRTF's zu simulieren.

### Methode und Modellierung

Die HRTF ist allgemein durch das Verhältnis von zwei im Freifeld gemessenen Schalldrucksignalen definiert: (Schalldruckspektrum am Ohr des Probanden) / (Schalldruckspektrum an zentraler Kopfposition wenn Proband nicht da ist) [2].

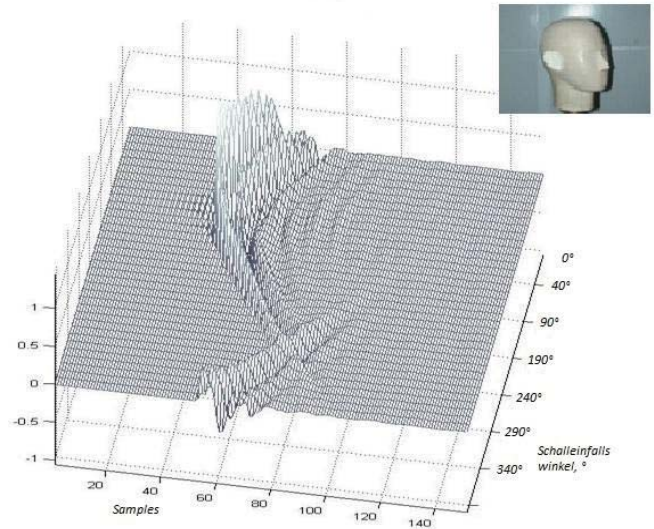
Die Messungen von individuellen und Kunstkopf-HRTF's sind gemäß dieser Definition in einem Referenzverfahren durchgeführt worden:



**Abbildung 1:** Die Messung der HRTF's in einem Referenzverfahren, schematisch dargestellt.

Die gemessenen HRTF's wurden anschließend in zeitlicher Auflösung durch ein asymmetrisches, gaußförmiges Fenster geglättet und im Weiteren als Zielfunktionen benutzt. Die Übertragungsfunktion eines Mikrofonarrays aus n Kugelmikrofonen an den Orten  $\vec{r}_n$  kann näherungsweise für den Schalleinfall ebener Wellen wie folgt beschrieben werden[3]:

$$H_1 e^{-ik\vec{r}_1} + H_2 e^{-ik\vec{r}_2} + \dots + H_n e^{-ik\vec{r}_n} = HRTF(\omega, \varphi) \quad (1)$$



**Abbildung 2:** Die gemessenen Impulsantworten des Oldenburger Kunstkopfs[4].

Für ein einzelnes Mikrofon ( $n=1$ ), kann die komplexe und vom Schalleinfallswinkel abhängige Filterfunktion  $H_1$  analytisch ausgerechnet werden:

$$H_1(\omega, \varphi) = HRTF(\omega, \varphi) \cdot e^{+ik\vec{r}_1} \quad (2)$$

$H_1$  über alle Schalleinfallrichtungen  $\vec{r}_1$ , komplex gemittelt, ist dann nur noch von der Position des Mikrofons abhängig.

$$\langle \overline{H_1} \rangle_\varphi = \langle \overline{A_{H_1}} \cdot e^{i\phi_{H_1}} \rangle_\varphi \quad (3)$$

Die Übertragungsfunktion des einzelnen Mikrofons:

$$M_1(\omega, \varphi) = \langle \overline{H_1} \rangle_\varphi e^{-ik\vec{r}_1} \quad (4)$$

Ein Optimierungskriterium des Mikrofonarrays wäre dann das Minimum der komplexen Abweichung von der Zielfunktion. Eine solche Position  $\vec{r}_1$  wird für das erste Mikrofon so ermittelt, dass die komplexe Abweichung der Übertragungsfunktion zur Zielfunktion – der entsprechenden HRTF - minimal wird.

$$(M_1 - HRTF) \cdot (M_1 - HRTF)^* = \min \quad (5)$$

Nach demselben Iterationsprinzip kann die Filterfunktion

$H_2$  und die optimale Position  $\vec{r}_2$  für das 2. Mikrofon bestimmen:

$$H_2(\omega, \varphi) = (HRTF - M_1) \cdot e^{+ik\vec{r}_2} \quad (6)$$

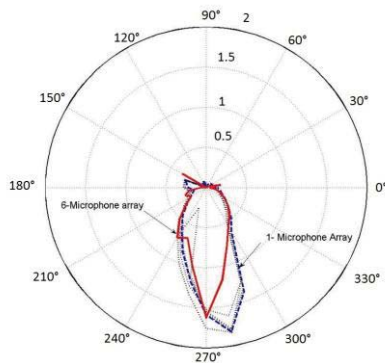
$$M_2(\omega, \varphi) = M_1 + \langle \overline{H_2} \rangle_\varphi e^{-ik\vec{r}_2} \quad (7)$$

Danach ergeben sich die Filterfunktionen  $H_n$  für weitere Mikrofone bis die gewünschte Annäherung an den Zielwert erreicht ist.

### Ergebnisse

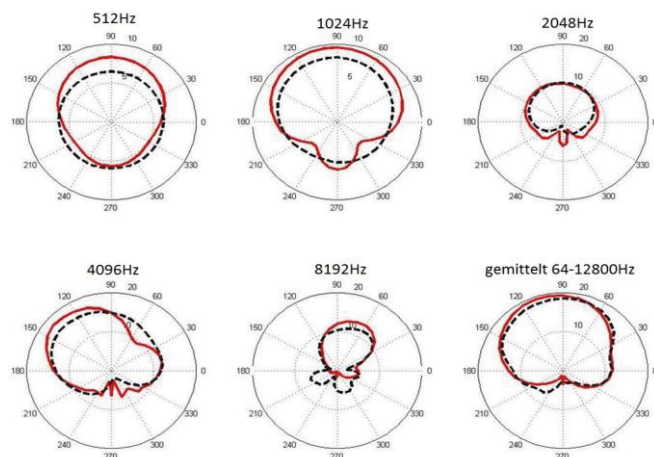
Das Optimierungsverfahren wurde auf die individuellen HRTF's von 4 Versuchspersonen und den HRTF's des Oldenburger Kunstkopfes angewendet. Die optimierten Filterfunktionen und die besten Positionen der maximal 6 involvierten Mikrofone pro Kanal (Ohr) wurden ermittelt.

Die Übertragungsfunktionen der optimierten Mikrofonarrays wurden mit den Zielfunktionen (HRTF's) verglichen. Für den Oldenburger Kunstkopf ergibt sich, dass schon nach dem ersten optimal positionierten Mikrofon, mit einer dazu passenden Filterfunktion, die mittleren Abweichungen der Phase der meisten Schalleinfallrichtungen sehr klein werden. Kleine Steigerungen qualitativer Optimierung werden stufenweise durch die Hinzunahme weiterer (max. 6) Mikrofone erreicht.



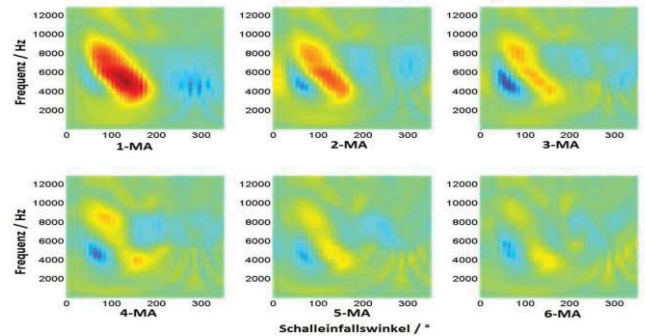
**Abbildung 3:** Die mittleren Abweichungen der Phase (in Rad) der ÜF von der Zielfunktion, für alle Schalleinfallswinkel.

Die Abweichung in der Phase erreicht ein Rad nur in einem recht schmalen Bereich der Schalleinfallrichtungen, wenn das Ohr im Schatten liegt. Das Maximum der Abweichung liegt bei 270°.



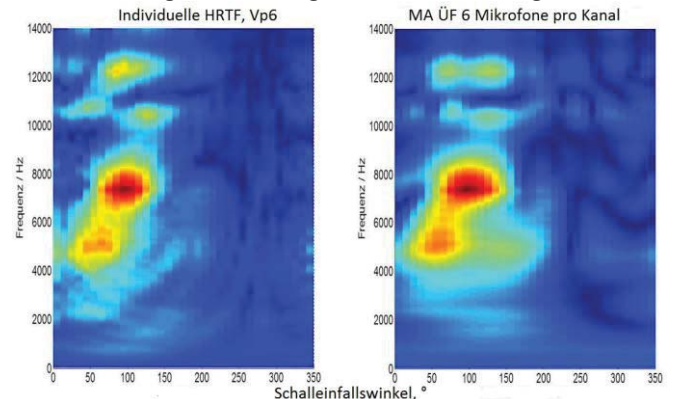
**Abbildung 4:** Die Richtcharakteristika des Oldenburger Kunstkopfes (durchgehende Linie) im Vergleich zu den Richtcharakteristika analytisch optimierter Mikrofonarrays.

Die Beträge der HRTF's des Oldenburger Kunstkopfes (hier als Richtcharakteristik dargestellt) zeigen, im Vergleich zu den Beträgen des analytisch berechneten Mikrofonarrays, zufriedenstellende Ähnlichkeit bei den unterschiedlichen Frequenzen. Bei den gemittelten Richtcharakteristika (im Bereich von 64Hz bis 12800Hz) ist die Übereinstimmung noch größer.



**Abbildung 5:** Standardabweichung der Beträge in Abhängigkeit von der Anzahl der Mikrofone in Array.

Die Standardabweichungen der Beträge werden mit jedem weiteren Mikrofon signifikant kleiner, sowohl bei der Anpassung an den Kunstkopf, als auch bei individuell angepassten HRTFs. 6 Kugelmikrofone pro Kanal(Ohr) scheinen eine gute Näherung der HRTF zu ermöglichen.



**Abbildung 6:** Zeigt links die gemessenen HRTFs des Probanden (Versuchsperson 6, linkes Ohr) und rechts die modellierten Übertragungsfunktionen eines Mikrofonarrays aus 6 Kugelmikrofonen.

### Ausblick:

Untersuchung des Näherungsverfahrens für Nierenmikrofone zur optimierten Anpassung der Richtcharakteristik. Erweiterung des Mikrofonarrays auf 3 Dimensionen.

### Literatur

[1] Becker, J., de la Fuente, M., Sapp, M., Messung kopfbezogener raumakustischer Parameter mit Mikrofonarrays, In Fortschritte der Akustik: DAGA 2000, S. 468–469.

[2] Møller, H., "Fundamentals of Binaural Technology"

[3] Mellert, V., Tohtuyeva, N., Die Sechs-Mikrofonanordnung als Ersatz für die Kunstkopf Aufnahmetechnik, Fortschritte der Akustik – DAGA 2000, p.560 – 561, 2000.

[4] Trampe, U., Akustische Übertragung des durchschnittlichen anthropomorphem Ausenohres, Diplomarbeit Universität Oldenburg, 1988.