

## Simultane Messung mehrerer HRTFs in nichtreflexionsarmer Umgebung

Simon Köhler<sup>1</sup>, Matthias Blau<sup>1</sup>, Steven van de Par<sup>2</sup>, Eugen Rasumow<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Hörtechnik und Audiologie, Email: simon.koehler@yahoo.de

<sup>2</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, AG Akustik

### Einleitung

Head-related transfer functions (HRTFs) beschreiben die richtungsabhängige Filterwirkung von Außenohr, Kopf und Torso. Sie finden Anwendung in der Binauralsynthese, bei der sich durch Vorfilterung dargebotener Kopfhörersignale ein künstlicher Richtungseindruck erzeugen lässt. Dies funktioniert subjektiv am besten mit den eigenen, individuellen HRTFs [1].

Die sequenzielle Messung von HRTFs ist je nach räumlicher Auflösung sehr zeitaufwändig und kann durch kleine Kopfbewegungen der Versuchsperson zu inkonsistenten HRTF-Sets führen. Ferner setzt die HRTF-Messung üblicherweise Freifeld-Bedingungen voraus, was für potenzielle Anwender der Binauralsynthese ggf. schwer realisierbar sein kann. In dieser Arbeit wird versucht, den Aufwand der HRTF-Messung durch simultane Messung mehrerer HRTFs und durch Messung in nicht-reflexionsarmer Umgebung zu reduzieren. Konkret sollen dabei die folgenden Fragestellungen untersucht werden.

- I. Führen simultan gemessene HRTFs im Vergleich zu sequenziell gemessenen HRTFs zu perzeptiven Unterschieden?
- II. Lassen sich qualitativ gleichwertige HRTFs in nicht-reflexionsarmen Räumen messen?

### Hörversuch I: sequenziell vs. simultan

Zur Untersuchung der ersten Fragestellung wurden HRTFs, die sequenziell und simultan in einem reflexionsarmen Raum gemessen wurden, miteinander verglichen. Der Vergleich erfolgte mit individuellen HRTFs und mit Kunstkopf-HRTFs, jeweils gemessen mit der blocked ear method nach [2].

#### Messverfahren

Die sequenziellen Messungen wurden mit 5 s langen Rauschsequenzen durchgeführt. Die simultanen Messungen wurden mit zeitversetzten exponentiellen Sweeps [3, 4] mit einer Länge von 5 s pro Sweep sowie mit unkorreliertem Rauschen (24x simultan, 5 s Länge) durchgeführt. Mit den exponentiellen Sweeps wurde ein INR<sup>1</sup> von 72 dB erzielt, mit simultanem, unkorreliertem Rauschen lediglich ein INR von 35 dB.

#### Versuchsbeschreibung

Zum Vergleich sequenziell und simultan gemessener HRTFs wurde ein ABX-Test mit je 16 Trials durchgeführt [5]. Der Test wurde mit individuellen HRTFs und mit Kunstkopf-HRTFs durchgeführt, jeweils gemessen

im reflexionsarmen Raum. Die HRIRs<sup>2</sup> wurden im Zeitbereich auf 5,1 ms relativ zum Direktschall bei Frontalschalleinfall gekürzt [6]. Die sequenziell gemessenen HRTFs dienten als Referenz. Getestet wurden die drei Schalleinfallrichtungen 0°, 90° und 225° in der Horizontalebene. Um die Reliabilität der fünf teilnehmenden Probanden zu prüfen, wurden zusätzlich stark gekürzte HRIRs (1,4 ms) als Anker dargeboten, bei denen ein Unterschied sicher hörbar sein sollte. Als Stimuli wurden weiße Rauschbursts mit einem Spektralgehalt bis 16 kHz verwendet, siehe Abb. 1.

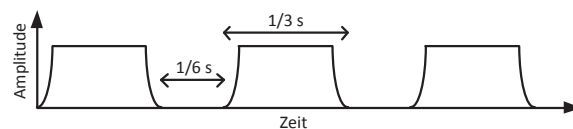


Abbildung 1: Zeitliche Struktur der Rauschbursts, die bei den Hörversuchen als Stimuli verwendet wurden.

### Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse des ABX-Tests. Der Anker wurde fast immer sicher erkannt. Bei den individuellen HRTFs zeigt sich, dass für 0° zum Teil Unterschiede hörbar sind, insbesondere bei den HRTFs, die mit Rauschen gemessen wurden. Verantwortlich dafür sind jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit Kopfbewegungen der Probanden. Für 90° und 225° sind fast keine Unterschiede hörbar. Bei den Kunstkopf-HRTFs zeigt sich, dass keine Unterschiede zwischen den sequenziell und simultan gemessenen HRTFs hörbar sind.

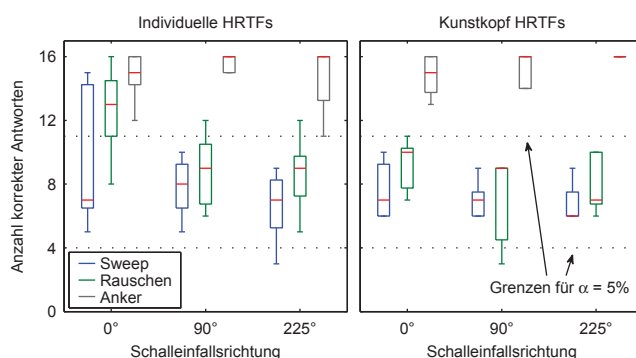


Abbildung 2: Ergebnisse des ABX-Tests mit individuellen und am Kunstkopf gemessenen HRTFs.

### Hörversuch II: reflexionsarm vs. nichtreflexionsarm

Zur Klärung der zweiten Fragestellung wurde ein Versuchsstand zur HRTF-Messung in einem nichtreflexionsarmen Raum entwickelt. Ein vertikaler Lautsprecherbogen wurde in einem Vorlesungsraum der Größe 10 × 7,75 ×

<sup>1</sup>impulse response to noise ratio

<sup>2</sup>head-related impulse response

$3\text{ m}^3$  mit einer Nachhallzeit von  $0,4\text{ s}$  aufgebaut. Späte Wandreflexionen wurden durch Fensterung der HRIRs eliminiert. Frühe Boden- und Deckenreflexionen wurden mit Absorbieren bedämpft, siehe Abb. 3.

### Versuchsbeschreibung

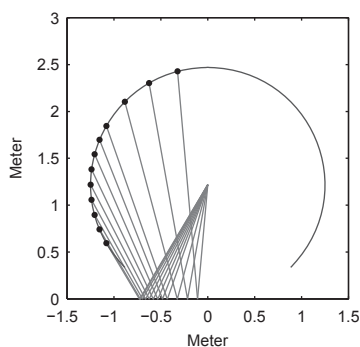
In einem Hörversuch wurden verschiedene Binauralsynthesen hinsichtlich der Kriterien Klangfarbe, Lokalisation und Gesamteindruck relativ zur echten Lautsprecherdarbietung im reflexionsarmen Raum bewertet. Die Bewertung erfolgte auf einer Ordinalskala von *bad* bis *excellent*. Für die Binauralsynthese wurden HRTFs gemessen im reflexionsarmen und im nichtreflexionsarmen Raum sowie zwei verschiedene HRIR-Längen verwendet:  $5,1\text{ ms}$  (enthält gedämpfte Bodenreflexion) und  $2,8\text{ ms}$  (Bodenreflexion abgeschnitten), jeweils relativ zum Direktschall bei Frontalschalleinfall. Es nahmen zehn Probanden an dem Hörversuch teil. Es wurden die gleichen Stimuli wie im ersten Hörversuch verwendet.

### Ergebnisse

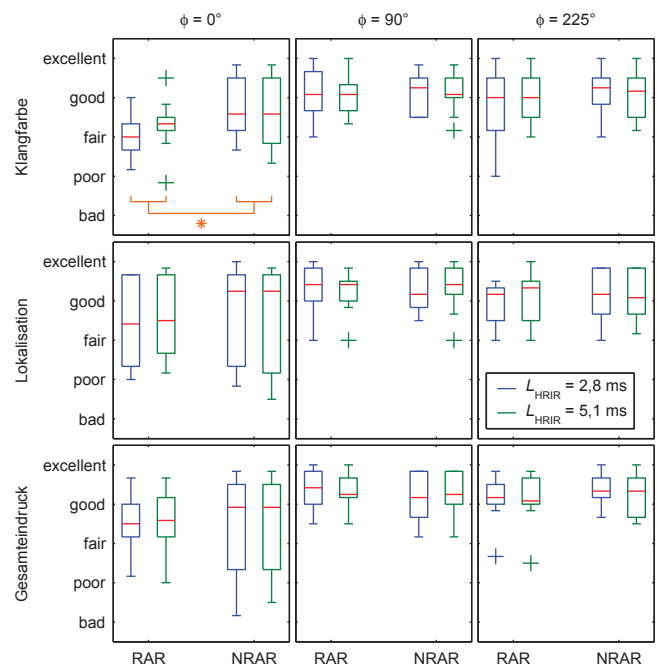
Abb. 4 zeigt die Ergebnisse des Hörversuchs. Effekte des Raumes und der HRIR-Länge wurden mit Hilfe einer ANOVA mit Messwiederholungen untersucht. Der Test auf Normalverteilung war für alle Verteilungen nicht signifikant. Ein signifikanter Effekt des Raumes ergab sich lediglich bei der Bewertung der Klangfarbe für  $0^\circ$  ( $p = 0,03$ ). Die HRTFs gemessen im nichtreflexionsarmen Raum wurden hier jedoch sogar besser bewertet. Bezüglich der HRIR-Länge ergibt sich kein signifikanter Effekt, d. h. relativ zur Referenz von  $5,1\text{ ms}$  führen die auf  $2,8\text{ ms}$  gekürzten HRIRs zu vergleichbaren Bewertungen.

### Fazit

Die Ergebnisse des ABX-Tests mit Kunstkopf-HRTFs weisen auf keine hörbaren Unterschiede zwischen den simultan und sequenziell gemessenen HRTFs hin. Ferner zeigt sich, dass bei der HRTF-Messung ein breitbandiges INR von  $35\text{ dB}$  für die Binauralsynthese ausreichend ist. Die Ursache für die teilweise hörbaren Unterschiede beim ABX-Test mit individuellen HRTFs stellen höchstwahrscheinlich Kopfbewegungen der Versuchspersonen während der Messung dar. Demnach wäre ein



**Abbildung 3:** Skizzierte Reflexionspfade der Bodenreflexionen (links) und Versuchsaufbau zur HRTF-Messung im nichtreflexionsarmen Raum mit Absorbieren an Boden und Decke (rechts).



**Abbildung 4:** Ergebnisse der subjektiven Bewertung individueller HRTFs, jeweils gemessen im reflexionsarmen (RAR) und nichtreflexionsarmen Raum (NRAR) und für zwei verschiedene HRIR-Längen.

ABX-Test zum Vergleich zeitlich nacheinander gemessener HRTFs nur bedingt geeignet, da allein Zeitvarianzen unabhängig vom Messverfahren oder vom Raum zu hörbaren Unterschieden führen können.

Beim Vergleich verschiedener Binauralsynthesen mit der Lautsprecherdarbietung führen die im nichtreflexionsarmen Raum gemessenen HRTFs zu einer mindestens gleich guten Bewertung wie die im reflexionsarmen Raum gemessenen HRTFs. Die Dämpfung der Bodenreflexionen ist demnach ausreichend. Ein Effekt der HRIR-Länge konnte nicht gezeigt werden, d. h. relativ zur Lautsprecherdarbietung führen die beiden HRIR-Längen  $5,1\text{ ms}$  und  $2,8\text{ ms}$  zu einer vergleichbaren qualitativen Bewertung.

### Literatur

- [1] Møller, H. et al.: Binaural Technique: Do we need individual recordings? J. Audio Eng. Soc 44 (1996)
- [2] Møller, H.: Fundamentals of Binaural Technology. Applied Acoustics 36 (1992)
- [3] Majdak, P. et al.: Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions. J. Audio Eng. Soc 55 (2007)
- [4] Dietrich, P. et al.: On the Optimization of the Multiple Exponential Sweep Method. J. Audio Eng. Soc 61 (2013)
- [5] Boley, J. and M. Lester: Statistical Analysis of ABX Results Using Signal Detection Theory. AES Convention, New York (2009)
- [6] Rasumow, E. et al.: Smoothing head-related transfer functions for a virtual artificial head. Acoustics, Nantes, France (2012)