Entwicklung und Evaluation eines Systems zur Messung individueller HRTFs in privater Wohn-Umgebung

Josef Poppitz, Matthias Blau, Martin Hansen
Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Hörtechnik und Audioligie,
Email: josef.poppitz@uni-oldenburg.de

Einleitung

Die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten sowie die resultierende Qualität binauraler Wiedergabetechnologie könnten erhöht werden, wenn es gelingt, den Aufwand zur Erhebung individueller HRTF-Datensätze zu senken. Im vorliegenden Beitrag wird dazu ein per Post versendbares Messsystem vorgestellt, mit dem der Endanwender zu Hause seine eigenen individuellen head-related transfer funktions (HRTFs) für definierte Quellpositionen in der Horizontalebene sowie die Kopfhörer-Übertragungsfunktionen (HPTFs) für den eigenen Kopfhörer messen kann. Im Vordergrund der Entwicklung standen eine kompakte Bauweise und ein geringer Bedarf an Hardware, sowie eine einfache und intuitive Bedienbarkeit. In einem Feldtest wurde dieses System zusammen mit einer Anleitung an technikaffine Probanden verschickt. Nach erfolgter zu-Hause-Messung wurden die Probanden ins Labor eingeladen, wo die HRTFs und HPTFs noch einmal mit einem Laboraufbau gemessen wurden. Der Aufbau des Systems, die Erfahrungen der Probanden mit der zu-Hause-Messung, die Ergebnisse eines Hörtests zur Bewertung der HRTF-Sätze und mögliche Anwendungsszenarien werden vorgestellt und diskutiert.

Anforderungen

Um die individuellen HRTFs einer Person zu messen, wird bei den meisten Messsystemen eine reflexionsarme Messumgebung vorausgesetzt, sowie ein aufwändiger Messaufbau benötigt. Das hier vorgestellte System soll das Messen in privater Wohnumgebung ermöglichen und durch einen einfache und intuitiv anwendbare Bedienung vom Anwender selbstständig durchgeführt werden. Die Gesamtkosten für die Hardware, inklusive aller Kabel und Soundkarte, soll unter 100 €liegen. Als Software kommt die Open-Source Programmiersprache Python 3.5 in der VersionMiniconda zum Einsatz.

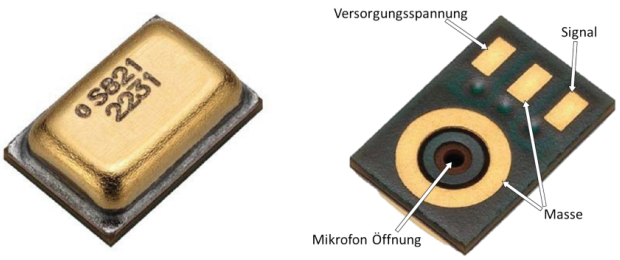
Entwicklung des Messsystems

Für die Messung kommen verschiedene Hardware-Bauteile zum Einsatz, welche zum einen baufertig und einsatzbereit direkt beim Hersteller geordert werden können. Zum anderen kommen Teile zum Einsatz, die zuvor modifiziert und zusammengebaut werden müssen (siehe Tabelle 1).

Der verwendete Lautsprecher bedarf einer linearen Frequenzgangentzerrung, da dessen Übertragungsfunktion keinen flachen Frequenzgang ausweist. Somit kann dessen Einfluss auf die HRTF-Messdaten minimiert werden. Bei der Messung der HRTFs kommt das Zero-Height SiSonic^{TM} Microphone SPV0840LR5H-B von Knowles zum Einsatz (siehe Abbildung 1).

Beschreibung	Anzahl	Bemerkung
Lautsprecher Speedlink XILU	1	direkt einsatzbereit
Stativ	1	direkt einsatzbereit
Klinken-Kabel 3m	1	direkt einsatzbereit
Klinken-Kabel mit 3 Steckern	1	konfiguriert
Mikrofon mit Halter, Kabel und Stecker	2	Eigenentwicklung
Schaumstoffstöpsel	1 Paar	konfiguriert
USB-Stick mit Software	1	-
Mikrofonspeisung	1	Eigenentwicklung
Soundkarte Terratec Aureon 7.1 mit USB-Kabel	1	eingekauft

Tabelle 1: Geräteliste der Messhardware.



(a) Ansicht von oben **(b)** Ansicht von unten

Abbildung 1: Zero-Height SiSonic^{TM} Microphone SPV0840LR5H-B von Knowles, rechts mit Belegung der Kontakte und Kennzeichnung der Mikrofon Öffnung. Maße: 2,75 x 1,85 x 0,9 mm (L x B x H).

Um das Mikrofon im Gehörgang zu platzieren und eine sichere Handhabung für den Anwender zu gewährleisten, wurde ein Mikrofonhalter entwickelt, welcher eine stabile Verbindung zwischen Mikrofon, Schaumstoffstöpsel und den Kabeln der Mikrofone ermöglicht. Aus hygienischen Gründen kann der Schaumstoffstöpsel, mit dem der Mikrofonhalter im Gehörgang gehalten und positioniert wird, ausgewechselt werden. Abbildung 2 zeigt das im Ohr platzierte Mikrofon mit dem Schaumstoffstöpsel (gelb) und dem Kabel.

Ebenso wird eine Mikrofonspeisung benötigt, welche die Mikrofone mit der benötigten Betriebsspannung von 3,5 V versorgt.

Abbildung 2: Mikrofon mit Kabel, Halter und Schaumstoffstöpsel (gelb) im Gehörgang platziert.

Abbildung 3 zeigt eine Übersicht mit allen Hardwarekomponenten, die für die Messung benötigt werden.

Abbildung 3: Übersicht der benötigten Hardwarekomponenten des fertigen Messsystems.

Bei der Programmierung wurden drei wesentliche Punkte realisiert. Zum einen die Entzerrung des Lautsprechers, zum anderen die Messung der HRTFs, sowie die Messung der Kopfhörerübertragungsfunktion, welche für die Binauralsynthese benötigt wird.

Als Messsignal kam ein exponentieller Sweep nach [1] zum Einsatz:

$$s(t) = \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L \cdot e^{(t/L)} - 1\right) \quad (1)$$

$$\text{mit} \quad L = \frac{T_{desd} \cdot f_1}{ln(f_2/f_1)}/f_1 \quad (2)$$

Die Impulsantwort wurde nach [1] berechnet. Für die Entzerrung des Lautsprechers sowie des Kopfhörers wurde die regularisierte, inverse Impulsantwort nach [2] berechnet. Die Lautsprecherentzerrung muss vorab individuell für den verwendeten Lautsprecher in einem reflexionsarmen Raum durchgeführt werden. Durch das Speichern des Entzerrungsfilters kann der Laursprecher bei der Messung der HRTFs in privater Wohn-Umgebung mit einem flachen Frequenzgang verwendet werden. Der Raum, in dem der Anwender seine individuellen HRTFs messen möchte, muss die folgenden Mindestanforderungen erfüllen:

- Raumgröße von mindestens 9 m^2.
- Keine gegenüberliegenden Wände, die weniger als 2 m voneinander entfernt sind.
- Mindestraumhöhe von 2,30 m.
- Fläche zum Messen von ca. 2 m x 1 m, wenn möglich in der Mitte des Raumes.
- Keine großen, stark reflektierenden Flächen wie große Wände, Tischplatten, Glasfronten etc.
- Keine zu große Lärmbelastung von außen durch z.B. Straßenlärm, Baustellen, spielende Kinder etc.

Die Messung der HRTFs kann vom Anwender selbständig Hause durchgeführt werden. Der Anwender platziert dazu den Lautsprecher in 1 m Entfernung auf Kopfhöhe vor sich. Mit den Mikrofonen im Ohr dreht sich der Anwender auf einem Stuhl sitzend in 45°-Schritten um den Kopfmittelpunkt. Die Python-Skripte und die Python-Distribution liegen in einem Ordner und werden mit einer Batch-Datei gestartet. Die Messung wird über die Tastatur gesteuert und neben der Anleitung erhält der Anwender Informationen auf der command-line. Die Messdauer beträgt ca. 5 Minuten. Eine Messung der HRTFs ist in Abbildung 4 dargestellt. Abgebildet sind die HRIRs (head-related impulse responses) für das linke und rechte Ohr in 45°-Schritten. Ab 3,8 ms bzw. 180 Samples sind Raumreflexionen zu erkennen, deren Einflüsse durch eine Kürzung der Impulsantworten auf 180 Samples minimiert werden können.

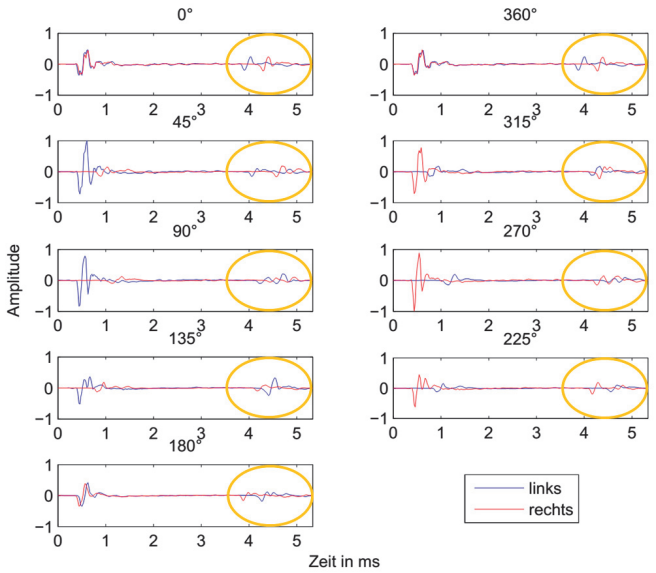


Abbildung 4: HRIRs einer Beispielmessung in einem kleinen Raum. Die Wände mit dem geringsten Abstand liegen 2,20 m auseinander. Orange gekennzeichnet sind die durch den kleinen Messraum entstehenden Reflexionen, deren Einflüsse durch eine Kürzung der HRIRs minimiert werden können.

Für die Binauralsynthese wird ebenfalls die Übertragungsfunktion des Kopfhörers benötigt. Bei

der Wiedergabe wird diese invertiert und somit der Kopfhörer entzerrt. Um die Übertragungsfunktion zu messen, werden dieselben Mikrofone wie bei der Messung der HRTFs verwendet. Die Vorgehensweise ist gleich wie bei der Entzerrung des Lautsprechers, jedoch wird die Messung selbstständig durch den Anwender und in privater Wohn-Umgebung durchgeführt. Da der Kopfhörer bei jedem Auf- und Absetzen eine leicht unterschiedliche Position auf dem Kopf aufweist und somit auch die Übertragungsfunktion variiert, wird die Messung 10 mal wiederholt. Nach jeder Messung wird der Kopfhörer ab- und wieder aufgesetzt. Für die Invertierung wird diejenige gemessene Übertragungsfunktion ausgewählt, welche nur gering ausgeprägte Minima ausweist und nur einen geringen Dynamikbereich hat [3].

Evaluation

Um das Messsystem zu testen und die Qualität der damit gemessenen HRTFs zu überprüfen, wurde ein Feldtest mit elf normalhörenden Probanden durchgeführt. Es wurden die HRTFs der Probanden gemessen, jeweils in privater Wohn- Umgebung und unter Laborbedingungen im reflexionsarmen Raum des Instituts für Hörtechnik und Audiologie der Jade Hochschule Oldenburg. Die Messung der HRTFs in privater Wohn-Umgebung wurde selbstständig durch die Probanden durchgeführt, wobei es lediglich die bereits erwähnten Einschränkungen bei der Größe des Messraumes gab. Bei der Messung der HRTFs im reflexionsarmen Raum war ein fester Aufbau von 8 Lautsprechern vorhanden, es bedurfte also keiner Drehung und selbstständigen Ausrichtung des Probanden beim Messen der verschiedenen Winkel. Abschließend wurde ein Hörtest durchgeführt, bei dem die Probanden ein Schallsignal, welches mit den gemessenen HRIRs gefaltet und über einen Kopfhörer wiedergegeben wurde, mit dem Schallsignal aus einer realen Schallquelle vergleichen und bewerten. Die GUI zum Steuern der Wiedergabe und zur Bewertung ist in Abbildung 5 dargestellt.

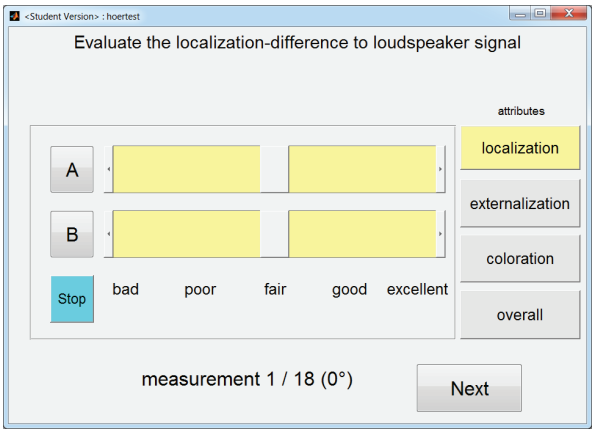


Abbildung 5: GUI zum Vergleichen und Bewerten der HRTFs. Links in der GUI: Auswahl der Stimuli (A oder B); Rechts in der GUI: Auswahl der Attribute; In der Mitte: Schieberegler zum Bewerten der jeweiligen Stimuli anhand des ausgewählten Attributs; unten rechts: Next zum Wechsel zwischen den Winkeln.

Die Bewertung erfolgt mit der kontinuierlichen Skala von bad, poor, fair, good bis excellent anhand der Attribute Lokalisation, Externalisation, spektrale Klangverfärbung und Gesamteindruck.

Die Beurteilungen der Versuchspersonen sind in Form von Boxplots für die Attribute Lokalisation und Gesamteindruck in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt.

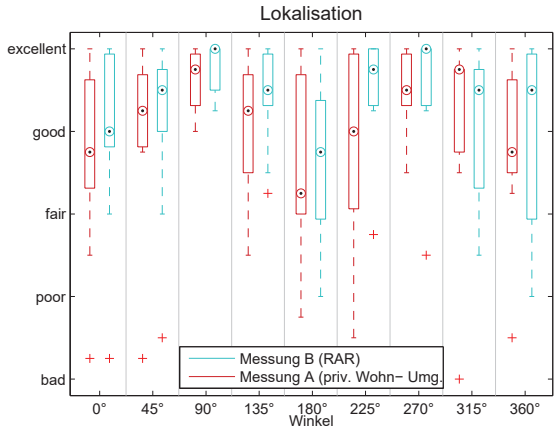


Abbildung 6: Bewertungsergebnisse aller Probanden für das Attribut Lokalisation. Messung A für die Zuhause gemessenen HRTFs und Messung B für die im RAR gemessenen HRTFs.

Für alle Winkel ist der Verlauf der Mediane bei Messung A (HRTF-Messung in privater Wohn-Umgebung) und Messung B (HRTF-Messung im RAR) sehr ähnlich. Der Interquartilabstand der Bewertung für die Winkel 90° und 270° liegt jeweils zwischen good und excellent, was für eine gute Lokalisation bei seitlichem Schalleinfall spricht. Je mehr der Schalleinfall von vorn oder von hinten erfolgt, desto schlechter wird die Lokalisation bewertet und die Interquartilabstände werden größer. Vor allem bei 0°/360° und 180° wird die Lokalisation schlechter bewertet als bei seitlichem Schalleinfall.

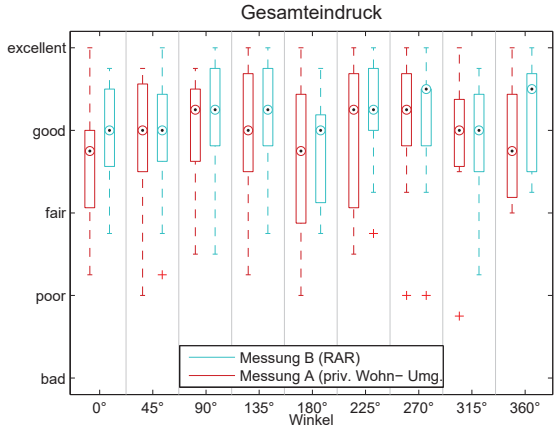


Abbildung 7: Bewertungsergebnisse aller Probanden für das Attribut Lokalisation. Messung A für die Zuhause gemessenen HRTFs und Messung B für die im RAR gemessenen HRTFs.

Der Gesamteindruck der dargebotenen Schallsignale wird im Mittel bei allen Winkeln und bei beiden Messungen mit good bewertet. Dabei fällt auf, dass 180°, also Schalleinfall von hinten, eher geringfügig schlechter bewertet

wird. Die im RAR gemessenen HRTFs werden etwas besser bewertet als die Zuhause gemessenen. Die Streuung fällt ebenfalls geringer aus.

Eine statistische Analyse der Messwerte (Friedmann-Test) hat gezeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den gemessenen HRTFs in privater Wohn- Umgebung und denen im reflexionsarmen Raum gibt. Die p-Werte des Friedmann-Tests sind in Tabelle 2 enthalten. Das Signifikanzniveau von 0,05 wird bei keinem der Stichproben unterschritten.

p-Werte	φ=0°	φ=45°	φ=90°	φ=135°	φ=180°	φ=225°	φ=270°	φ=315°	φ=360°
Lokalisation	0.0588	0.4795	0.2568	0.1573	1.0000	0.4795	0.4142	0.7055	0.4795
Externalisation	0.7389	0.1025	0.3173	0.3173	0.7055	0.4795	0.7055	0.7055	0.3173
Klangverf.	0.7389	0.7389	0.7389	0.7630	0.2059	0.5271	0.3173	0.7630	0.4795
Gesamteindr.	0.7389	0.7055	0.7055	1.0000	0.7389	0.7389	0.2568	0.5271	0.5271

Tabelle 2: p-Werte für den Friedman-Test für alle untersuchten Stichproben.

Der Hörtest hat insgesamt gezeigt, dass es zwischen den gemessenen HRTFs in privater Wohn- Umgebung und denen im reflexionsarmen Raum keine hörbaren Unterschiede gibt. Somit kann angenommen werden, dass das Messsystem funktionsfähig ist und die HRTF-Datensätze eine ausreichend hohe Genauigkeit für die Anwendung in der Binauralsynthese aufweisen.

Literatur

[1] Novak, Antonín; Simon, Laurent; Kadlec, Frantiŝek; Lotton, Pierrick: Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal. In: IEEE transactions on instrumentation and measurement Vol. 59, Nr. 8 (August 2010), S. 2220 – 2229

[2] Kirkeby, Ole; Nelson, Philip A.: Digital Filter Design for Inversion Problems in Sound Reproduction. In: JAES Volume 47 Issue 7/8 (Juli 1999), S. 583–595

[3] Rasumow, Eugen: Synthetic reproduction of head-related transfer functions by using microphone arrays. Oldenburg, Fakultät für Medizin und Gesundheitswissenschaften, Carl von Ossietzky Universität, Dissertation, März 2015