

Projektarbeit

Verbesserung der virtuellen Akustik für Kopfhörer durch Berücksichtigung von Schulterdrehungen relativ zum Kopf

Georg Koller

1. November 2008, Graz

Betreuer: DI Franz Zotter

Institut für Elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz



UNIVERSITÄT
FÜR MUSIK UND
DARSTELLENDEN KUNST
GRAZ - AUSTRIA

Inhaltsverzeichnis

1	Introduction	3
1.1	Abstract	3
2	Einleitung	4
2.1	Kurzfassung	4
3	Implementierung der Schulterdrehung	5
3.1	Implementierung der TRIRs als Differenzsignal	6
3.1.1	Ergebnisse	9
3.2	Implementierung der HTRIRs	9
3.2.1	Ergebnisse	10
3.3	Implementierung der HTRIRs ohne Ambisonic	10
3.3.1	Ergebnisse	11
4	Hörversuch	11
4.1	Methode	11
4.2	Erzeugen der Testsignale	12
4.2.1	Quellsignal	12
4.2.2	„HTRIR.pd“	13
4.3	Aufbau des Hörversuchs	15
4.4	Ergebnisse des Hörversuchs	16
5	Zusammenfassung und Ausblick	19
6	Literaturverzeichnis	20

1 Introduction

Improvement of the virtual acoustic for headphones by considering shoulder rotation relative to the head

Human auditory perception obtains most of the directional localization of sound events from level- and time differences (ILD, ITD)¹ of incident sounds on both ears. In virtual acoustics, this is simulated by head-related, frequency-dependent filters (HRTFs)².

In practical measurements of these filters, a rigid geometry between head and shoulder is considered most often. However recent studies have shown that the rotation of the head relative to the shoulder axis has effects on the HRTFs in some areas.

Consequently, the head rotation in these areas also affects aural perception and directional localization. With the help of further filters, this influence on the HRTFs can be reproduced.

1.1 Abstract

In the first part of this project, different realisations of a virtual acoustic environment were produced by means of PD³, which take into account the influence of shoulder rotation relative to the head. The necessary impulse responses were measured by Markus Guldenschuh in his project „Untersuchung des Schultereinflusses auf HRIRs⁴“ [1] and provided for this project. The realisations only led to humble results. Therefore the perception of shoulder rotation was illuminated in the second part of this project. For this purpose a listening test was done, investigating the perception differences of static and dynamically rotating shoulder.

¹ ILD ... Interaural Level Difference, ITD ... Interaural Time Difference

² HRTFs ... Head Related Transferfunctions

³ PD ... Pure Data, real-time, graphic, „open source“ programming language

⁴ HRIRs ... Head Related Impulse Responses

2 Einleitung

Die menschliche Hörwahrnehmung bezieht einen Großteil der Richtungslokalisierung von Schallereignissen aus frequenzabhängigen Pegel- und Laufzeitunterschieden (ILD, ITD)⁵ des eintreffenden Schalls an beiden Ohren. Dies wird in der virtuellen Akustik durch kopfbezogene, frequenzabhängige Filter (HRTFs)⁶ nachgebildet. Bei der Bestimmung dieser Filter wird in der Praxis zumeist eine starre Geometrie zwischen Kopf und Schulter herangezogen.

Jüngste Arbeiten haben jedoch gezeigt, dass die Drehung des Kopfes relativ zur Schulterachse in gewissen Bereichen einen starken Einfluss auf die HRTFs hat. Was den Schluss nahe legt, dass die Kopfdrehung in diesen Bereichen auch Einfluss auf die Hörwahrnehmung und Richtungslokalisierung hat. Dieser Einfluss auf die HRTFs konnte durch weitere Filter (TRIRs)⁷ nachgebildet werden.

2.1 Kurzfassung

Im ersten Teil dieser Projektarbeit wurden mit Hilfe von PD⁸ verschiedene Realisationen einer virtuellen, akustischen Umgebung erzeugt, die den Einfluss der Schulterdrehung relativ zum Kopf berücksichtigen. Die dafür notwendigen Impulsantworten wurden von Markus Guldenschuh im Rahmen seiner Projektarbeit „Untersuchung des Schultereinflusses auf HRIRs⁹“ [1] gemessen und für dieses Projekt zur Verfügung gestellt.

Die Realisationen führten nur zu bescheidenen Ergebnissen, deshalb wurde im zweiten Teil dieser Projektarbeit die Wahrnehmbarkeit der Schulterdrehung beleuchtet. Dazu wurde ein Hörversuch durchgeführt der die Wahrnehmungsunterschiede bei statischer und dynamisch rotierender Schulter untersucht.

⁵ ILD ... Interaural Level Difference, ITD ... Interaural Time Difference

⁶ HRTFs ... Head Related Transferfunctions

⁷ TRIRs ... Torso Related Impulse Responses

⁸ PD ... Pure Data, echtzeitfähige, graphische, „open source“ Programmiersprache

⁹ HRIRs ... Head Related Impulse Responses

3 Implementierung der Schulterdrehung

Für die Implementierung wurde eine bestehende virtuelle, akustische Umgebung für Kopfhörer mit den benötigten Programmteilen erweitert. Die dafür verwendete Umgebung ist ein echtzeitfähiges Binaural-Ambisonic-System [2], das durch ein Tracking-System gesteuert wird.

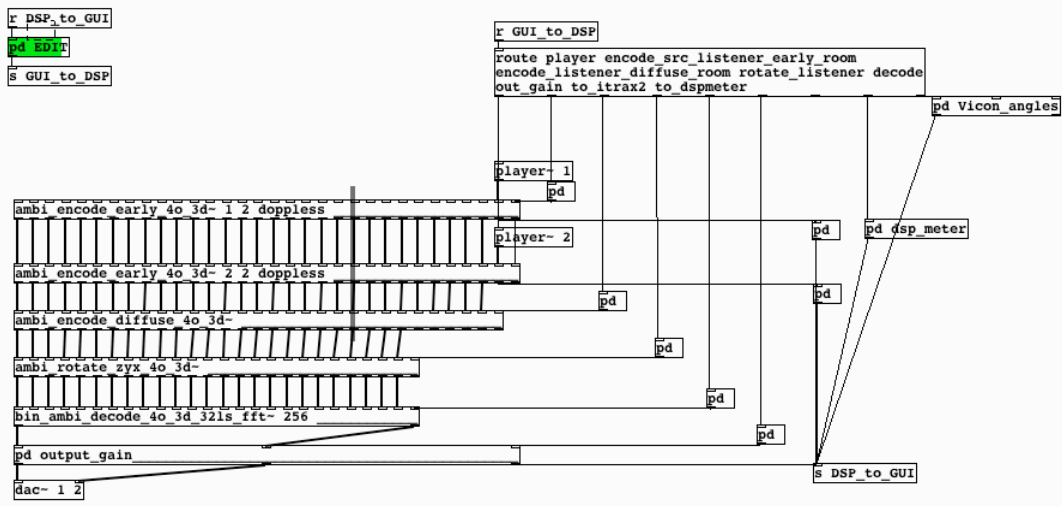


Abb. 1: Bestehendes Binaural Ambisonic System

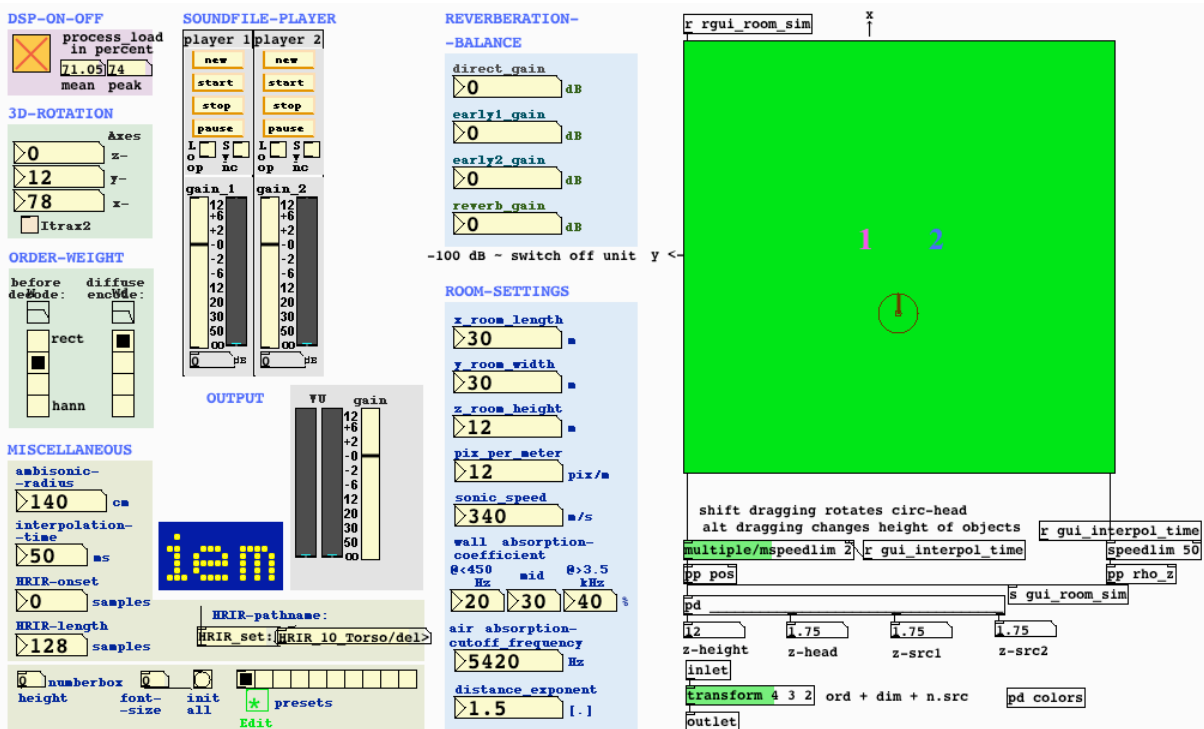


Abb. 2: Graphische Oberfläche des bestehenden Binaural Ambisonic System

3.1 Implementierung der TRIRs als Differenzsignal

Nach dem Ansatz aus der Projektarbeit von Markus Guldenschuh sind die Schulterreflexionen nur in bestimmten Bereichen von energetischer Relevanz und können durch eine additive Korrektur eines SSH-Grundgerüsts¹⁰ modelliert werden ([1], Kapitel 6).

Für die Umsetzung dieses Ansatzes wurde das SSH-Grundgerüst als Set von HRIRs im Menüpunkt „HRIR-pathname:“ der graphischen Oberfläche des bestehenden Binaural Ambisonic System geladen. Zusätzlich wurde der PD-Patch „pd Vicon_angles“ neu geschrieben, da dieser von Itrax auf Vicon umgestellt wurde und zur Gewinnung der Positions- und Richtungsdaten aus dem Tracking System (Vicon) dient.

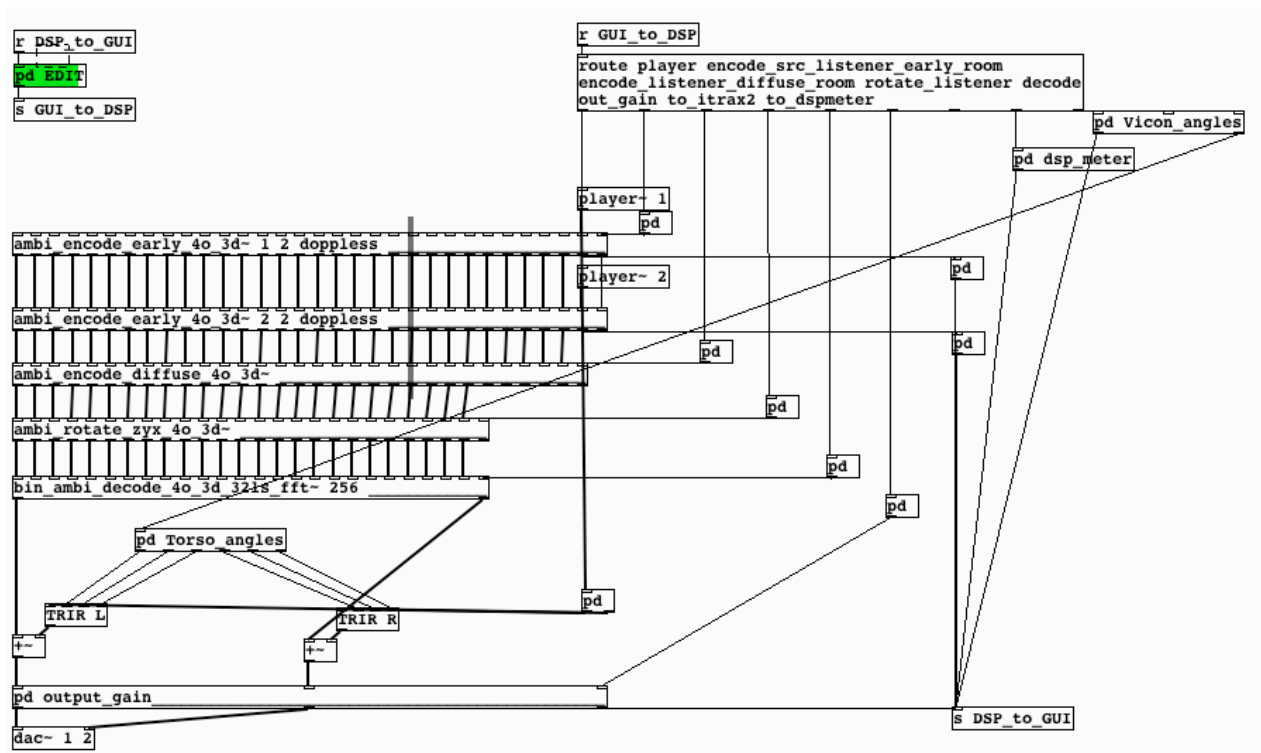


Abb. 3: Bestehendes Binaural Ambisonic System mit der Erweiterung der TRIRs als Differenzsignal

„pd Vicon_angles“ liefert einerseits die Position des Kopfes für das bestehende System und andererseits die relative Kopf- zu Schulterdrehung für den neu hinzugefügten Programmteil. Zur Bestimmung der Kopfposition wurde ein Marker-Objekt auf dem Kopfhörer befestigt und für die Bestimmung der Schulterdrehung

¹⁰ SSH-Grundgerüst ... Surface Spherical Harmonics

(Drehung um Z-Achse) wurde zusätzlich ein Marker-Objekt wie eine Halskette getragen. Die Kopf- zu Schulterdrehung wird in „pd Torso_angles“ in zwei gegenläufige Richtungen für die vorwärts und die rückwärts drehende Schulter geteilt und an den PD-Patch „TRIR L“ und „TRIR R“ übergeben.

An „TRIR L“ bzw. „TRIR R“ werden das Quellsignal und die Winkel (Elevation, Azimut und Torsodrehung) übergeben. Das Unterprogramm „pd TRIR“ erzeugt die zur Richtung gehörende TRIR und übergibt diese an den FIR-Filter um sie mit dem Quellsignal zu falten [3]. Anschließend wird das Signal noch um 192 Samples verzögert damit es mit dem Signalfuss des bestehendem Binaural Ambisonic Systems synchron ist.

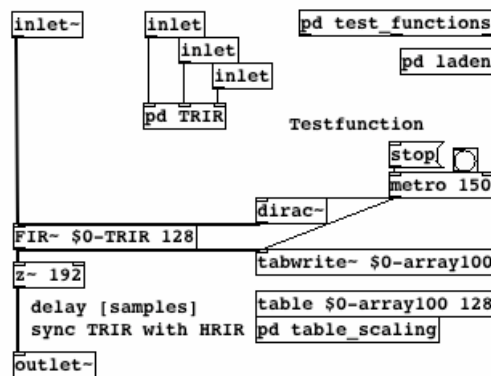


Abb. 4: PD-Patch „TRIR L“ bzw. „TRIR R“

„pd TRIR“ entspricht einem dynamischen Vektor der je nach Winkelangabe verändert wird. Hierzu werden die Winkel in „pd angle“ modifiziert und danach entweder an „pd TRIR_front“ oder „pd TRIR_back“ übergeben, wo der zu den Winkelangaben passende Vektor erzeugt wird.

$$\begin{pmatrix} Imp_{[1]} \\ Imp_{[2]} \\ \dots \\ Imp_{[22]} \end{pmatrix}$$

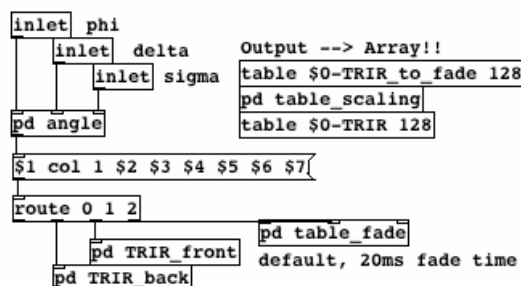


Abb. 5: PD-Patch „pd TRIR“

„pd angle“ besteht aus den von Markus Guldenschuh [1] angegebenen Begrenzungen der Bereiche, in denen die Reflexionen der Schulter energetisch relevante Differenzen verursachen und liefert den Winkelterm.

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi^2 \\ \delta \\ \delta^2 \\ \varsigma \\ \varsigma^2 \end{pmatrix}$$

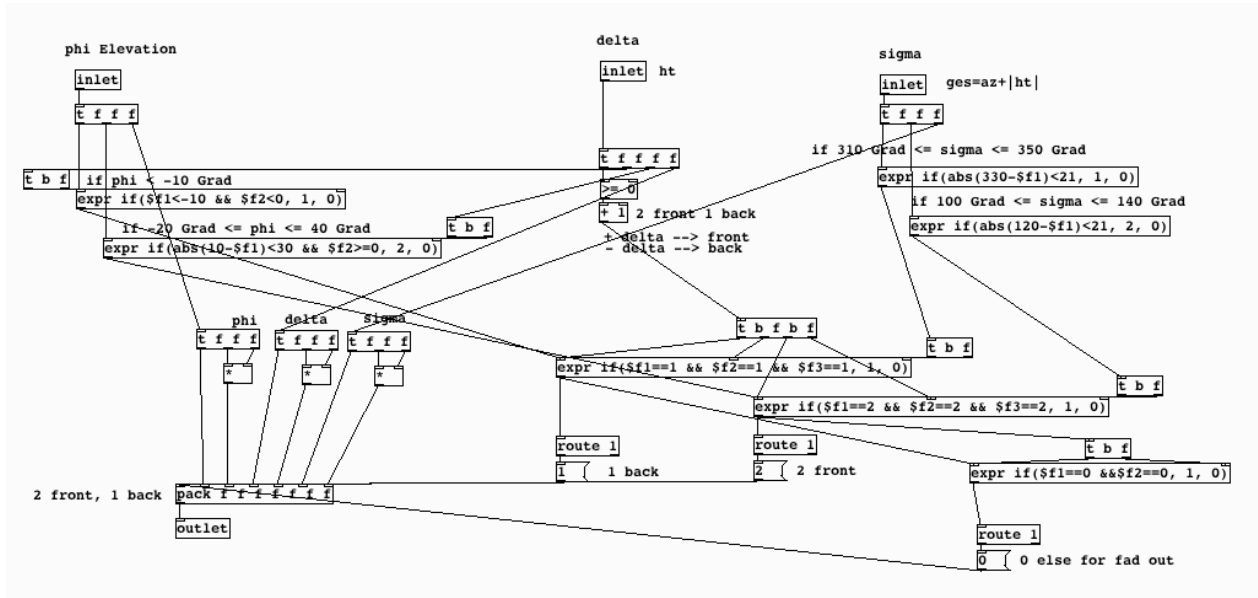


Abb. 6: PD-Patch „pd angle“

„pd TRIR_front“ entspricht dem in [1] aufgestellten Gleichungssystem (Abb.7) mit dem dazugehörigen Zeitverzögerungsterm (in Samples).

$$\begin{pmatrix} Imp_{[1]} \\ Imp_{[2]} \\ \dots \\ Imp_{[22]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} If_{1[1]} & If_{2[1]} \\ If_{1[2]} & If_{2[2]} \\ \dots & \dots \\ If_{1[22]} & If_{2[22]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi^2 \\ \delta \\ \delta^2 \\ \varsigma \\ \varsigma^2 \end{pmatrix}$$

Abb. 7: Gleichungsmodell für die nach vorne gedrehte Schulter [1]

$$C_{delay} = (0.424403 \quad 0.0005649 \quad 0.013636 \quad 0.00086 \quad 0.1592998 \quad -0.0002745)$$

Der Winkelterm wird übergeben und mit den zwei gegebenen Matrizen multipliziert. Der daraus entstandene Vektor entspricht der TRIR für diese Richtung und wird in „pd TRIR“ eingefadet und anschließend an den FIR-Filter im PD-Patch „TRIR“ (Abb.4) übergeben.

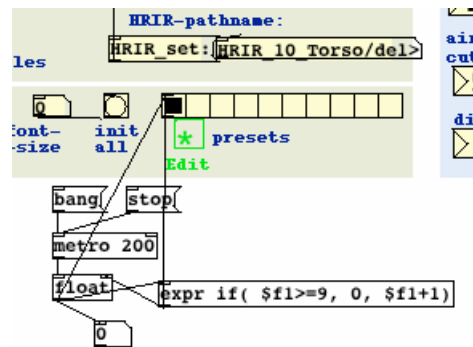


Abb. 9: Laden der „presets“

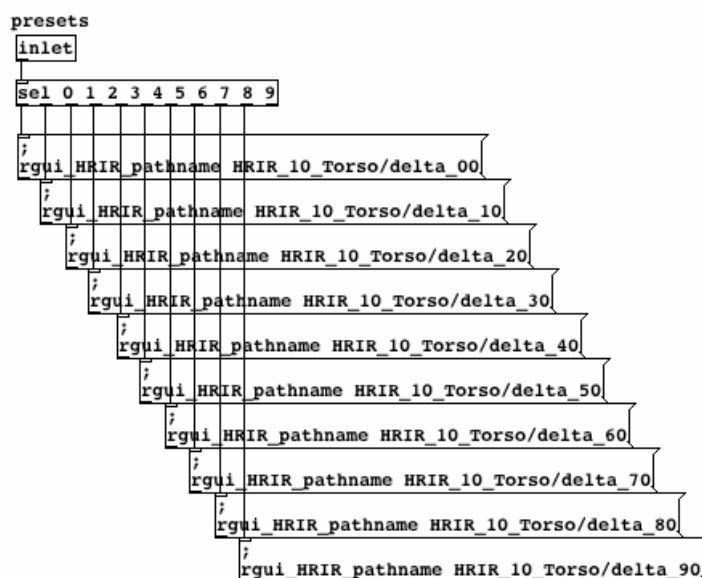


Abb. 10: Laden der verschiedenen Torsowinkel

3.2.1 Ergebnisse

Die Implementierung der gesamten HTRIRs führt nicht zu einem eindeutigen, sondern nur zu einem schwach hörbaren Einfluss des Torsos in den Bereichen mit hoher energetischer Veränderung. Eine mögliche Ursache für den geringen Einfluss wird in der reduzierten, räumlichen Auflösung von Ambisonic 4. Ordnung vermutet.

3.3 Implementierung der HTRIRs ohne Ambisonic

Um die räumliche Glättung die durch die Verwendung von Ambisonic 4. Ordnung entsteht auszuschließen, wurde das PD-Programm HTRIR.pd entwickelt, das in Kapitel 3.2.2 beschrieben wird.

3.3.1 Ergebnisse

Durch die ausschließliche Verwendung der gemessenen HTRIRs ist ein deutlicher Einfluss des Torsos auf die HRIRs feststellbar. Dies konnte mit einem Hörversuch nachgewiesen werden (Kapitel 4).

4 Hörversuch

Für die Durchführung des Hörversuchs wurde ein eigenständiges Pd-Programm (HTRIR.pd) geschrieben, das nur die aus den Messungen gewonnenen HTRIRs¹² verwendet. Damit werden Artefakte die durch Umrechnungen (Aufbrechen der HTRIRs in HRIRs¹³ und TRIRs¹⁴) oder durch die geringe Auflösung in Ambisonic (4.Ordnung) entstehen können vermieden.

Der Hörversuch konzentriert sich deshalb ausschließlich auf die Frage, ob ein Verändern der TRIR hörbar ist oder nicht. Alle weiteren Erkenntnisse und mögliche Tendenzen, die aus den Daten ablesbar sind, benötigen noch weitere Hörversuche um diese genauer zu untersuchen. Sie dienen ausschließlich der Diskussion und wollen Anstoß für weiterführende Forschung in diesem Gebiet geben.

4.1 Methode

Der Hörversuch wurde mit Hilfe der „Yes-No-Method“ [4] durchgeführt. Die Versuchsperson bekommt in zufälliger Reihenfolge entweder ein verändertes oder ein unverändertes Versuchspaar präsentiert und soll sich danach entscheiden ob es „gleich“ oder „verschieden“ war.

Um den Bias¹⁵ von der Sensitivität der Versuchspersonen zu trennen, wurde ein „Vertrauenswert“ eingeführt. Dieser „Vertrauenswert“ entspricht der „correct rejection“ [4] und ergibt sich aus den Antworten bei den Versuchspaaren die keinen Unterschied enthalten. „correct rejection“ gibt an, ob die Versuchsperson richtig erkennt, dass das Versuchspaar keinen Stimulus enthält bzw. das Versuchspaar „gleich“ ist. Es werden nur die Daten jener Probanden berücksichtigt deren

¹² HTRIRs ... Head and Torso Related Impulse Responses

¹³ HRIRs ... Head Related Impulse Responses

¹⁴ TRIRs ... Torso Related Impulse Responses

¹⁵ Unter Bias versteht man subjektive Einflüsse auf die Versuchsperson die zu einer Verfälschung des Antwortverhaltens führen können z.B.: Ermüdung, Erfahrung, Hörschäden, Fragestellung falsch verstanden etc. [4]

Vertrauenswert über 75% liegt. Das entspricht der Schwelle an dem eine Versuchsperson den Unterschied detektiert kann. Der Durchschnitt aller verwendeten Vertrauenswerte ergibt 87,3%. Es wurden 17 Probanden getestet von denen 13 Probanden den Vertrauenswert erreichen konnten.

4.2 Erzeugen der Testsignale

4.2.1 Quellsignal

Als Quellsignal wird gepulstes Rosa Rauschen (nach Ville Pulkki bzw. Middlebrooks) mit der Dauer von 4 Sekunden [5] gewählt.

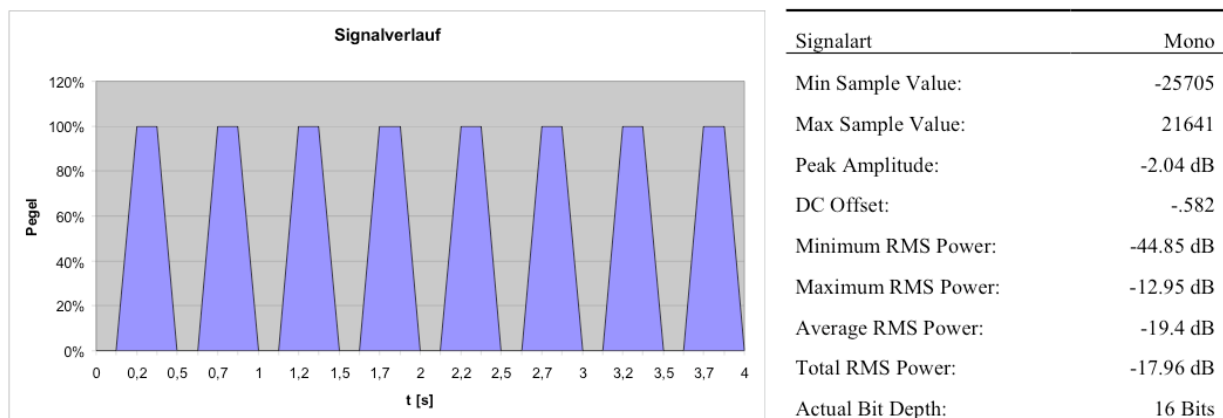


Abb. 11: Quellsignal: Eigenschaften und Verlauf, Hüllkurve, Full Scale [6]

Dieses Quellsignal wird für den Hörversuch mit verschiedenen HTRIRs gefaltet [3], um die Quelle für die Versuchsperson virtuell an verschiedenen Orten positionieren zu können.

Zur Gewinnung der Testsignale wird eine Kopf- zu Quellenposition eingestellt und dazu der Torso verändert. Daraus werden statische und dynamische Testsignale gebildet. Bei den statischen Testsignalen wird die gesamte Impulsfolge mit einer gewählten Einstellung der Torsodrehung von 90° oder 120° aufgenommen, während bei den dynamischen Signalen hingegen der Torso mit 200ms, 400ms oder 800ms pro 10° Schritten gedreht wird.

4.2.2 „HTRIR.pd“

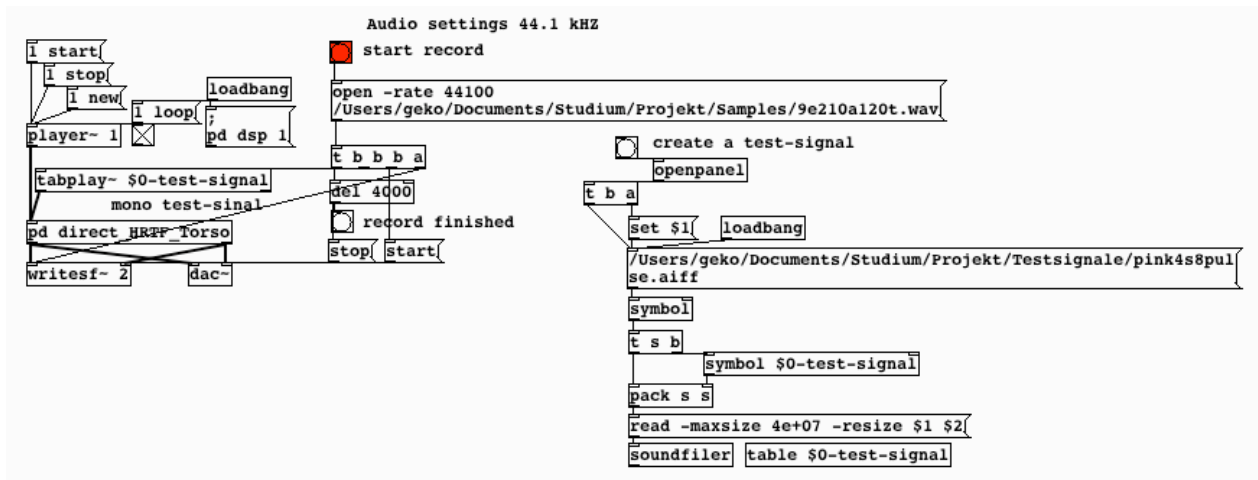


Abb. 12: HTRIR.pd

„create a testsignal“ lädt das Quellsignal in den Table „\$0-test-signal“. „start record“ startet die Aufnahme des Testsignals mit einer Samplerate von 44.1kHz im WAV-Format. Dafür wird das erzeugte Quellsignal an das Unterprogramm „direct_HRTF_Torso“ übergeben und binaural aufbereitet. Die Aufnahme endet automatisch nachdem das Quellsignal abgespielt wurde. Dadurch ergibt sich eine Länge von 4 sec für jedes Testsignal.

Das Quellsignal wird an das Unterprogramm „direct_HRTF_Torso“ als Mono-Signal übergeben. Daraus wird ein Binaural-Testsignal erzeugt, welches wieder an das Hauptprogramm „HTRIR.pd“ übergeben wird. Das Binaurale-Testsignal entspricht einem Stereo-Signal, das nur für die Wiedergabe über Kopfhörer geeignet ist.

Beim Überblenden zwischen zwei Richtungen (Abb. 13, „Morphen von HTRIRs“) wird folgende Filterfunktion [3] mit einer Taktfrequenz von 20 ms verwendet:

$$H(z) = \frac{0.5}{1 - 0.5z^{-1}} \quad h(n) = 0.5^n \cdot u(n)$$

Daraus wurde die Überblendungszeit $T_{90\%} = 66.43$ ms berechnet. Diese gibt an, wie lange das Umschalten von einer Richtung ($HTRIR_{alt}$) auf 90% einer anderen Richtung ($HTRIR_{neu}$) dauert.

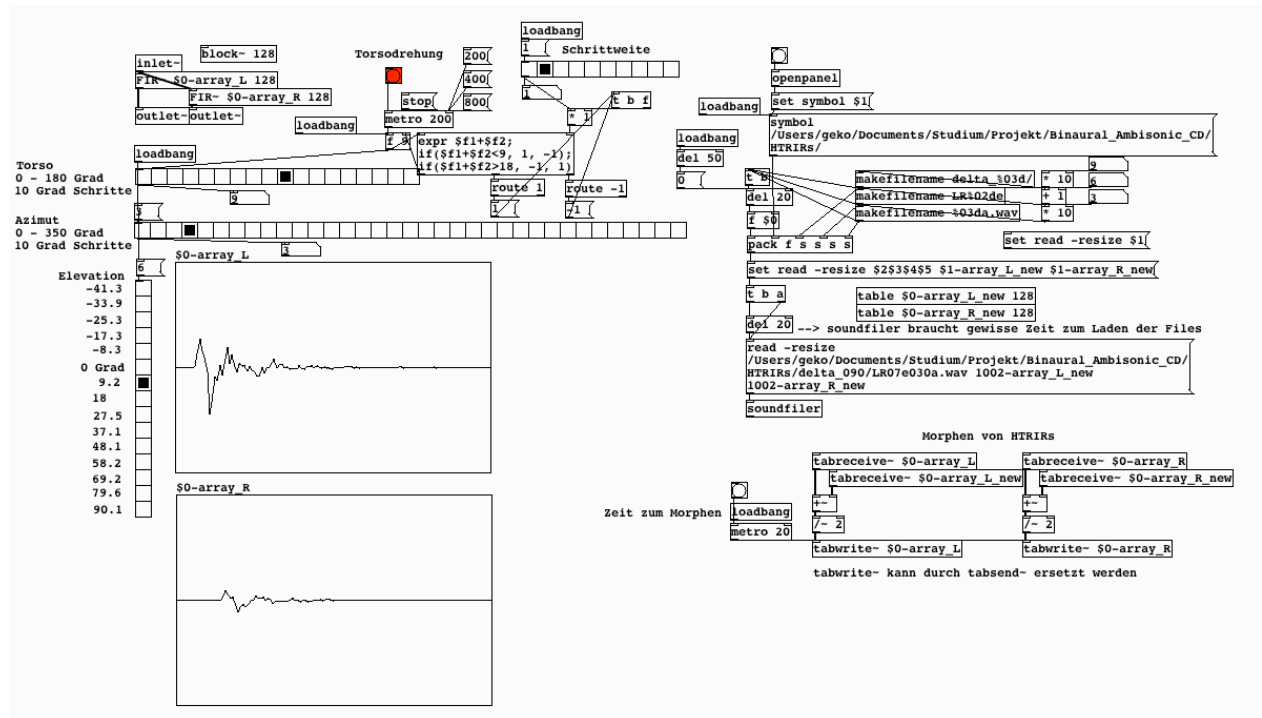


Abb. 13: direct_HRTF_Torso

Einstellbare Parameter:

- Die Elevation kann Schrittweise von $-41,3^\circ$ bis $90,1^\circ$ eingestellt werden. Die Schritte sind durch die verwendeten Messdaten vorgegeben.
- Der Azimut wurde in 10° Schritten gemessen und ist von 0° bis 250° einstellbar
- Der Torso ist von 0° bis 180° in 10° Schritten einstellbar. Gemessen wurde die Torso Drehung jedoch nur von 90° bis 180° , da sich die restlichen 0° bis 90° durch Spiegelung ergeben. Für die Erzeugung der Testsignale wurden nur die gemessenen 90° bis 180° Torsodrehung verwendet. Dabei wird der Torso von $90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow \dots$ gedreht.
- Die Winkelpositionen des Torsos können statisch ausgewählt werden oder in verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen werden. Für den Hörversuch wurden 200ms 400ms und 800ms pro 10° Torsodrehung gewählt.

Durch die Wahl der Parameter (Elevation, Azimut und Torso) wird der entsprechende Satz von HTRIRs aus den Messdaten geladen und in zwei Tables („\$0-array_L“ und „\$0-array_R“) gespeichert, um anschließend mit FIR-Filtern das Quellsignal zu falten [3]. Die geladenen Messdaten enthalten die Richtungsinformation der HTRIRs und erzeugen bei der Kopfhörerwiedergabe den Eindruck einer räumlichen Positionierung der Quelle.

4.3 Aufbau des Hörversuchs

Die 4 sec langen Testsignale werden nun für den Hörversuch aufbereitet. Dafür wird für jede verwendete Quellposition eine 2 min lange Tonspur erstellt.



Abb. 14: Aufbau eines Tracks des Hörversuchs

Jede Spur besteht aus 10 Versuchspaaren von denen zwei in Abb. 15 dargestellt sind. Jedes Versuchspaar setzt sich zusammen aus: 4 sec gefaltetem Quellsignal, 1 sec Pause, 4 sec gefaltetem Quellsignal, 3 sec Pause.



Abb. 15: Aufbau von zwei Versuchspaaren des Hörversuchs

Zur Veranschaulichung des Versuchsablaufs wurde zusätzlich noch eine Beispielspur mit 4 Versuchspaaren erzeugt. Die Gesamtlänge des Audiomaterials für den Hörversuch beträgt 16,8 min. Die Versuchspersonen setzten sich aus Toningenieuren, Musikern und Musikerinnen zusammen. Als Wiedergabe-Equipment wurde ein MacBook und ein Sennheiser HD210 Kopfhörer verwendet.

4.4 Ergebnisse des Hörversuchs

In Abb. 7 werden die Ergebnisse der Hörbarkeit des Torsos gezeigt. Hierzu wurden die Ergebnisse der Beispiele mit statischem und dynamisch verändertem Torso gemittelt.

Der Bereich der Schallquelle in dem die Schulter energetisch relevante Differenzen verursacht wurde von M. Guldenschuh [1] für die nach vorne gedrehte Schulter mit $-20^\circ < \varphi < 40^\circ$, $100^\circ \leq \vartheta + \delta \leq 140^\circ$ und die nach hinten gedrehte Schulter mit $\varphi < -10^\circ$, $310^\circ \leq \vartheta + \delta \leq 350^\circ$ begrenzt¹⁶.

Die Veränderungen, die durch den Torso hervorgerufen werden, liegen bis auf die Richtungen 18e30a¹⁷ und 58e50a über der Wahrnehmungsschwelle (75%). Die Torsostellungen bei Richtung 58e50a sind wie erwartet nicht wahrnehmbar, da der Elevationswinkel $\varphi = 58 > 40^\circ$ ist. Interessant ist jedoch, dass nach dem Energiekriterium aus [1] die Torsostellungen bei Richtung 18e30a eigentlich hörbar sein sollten.

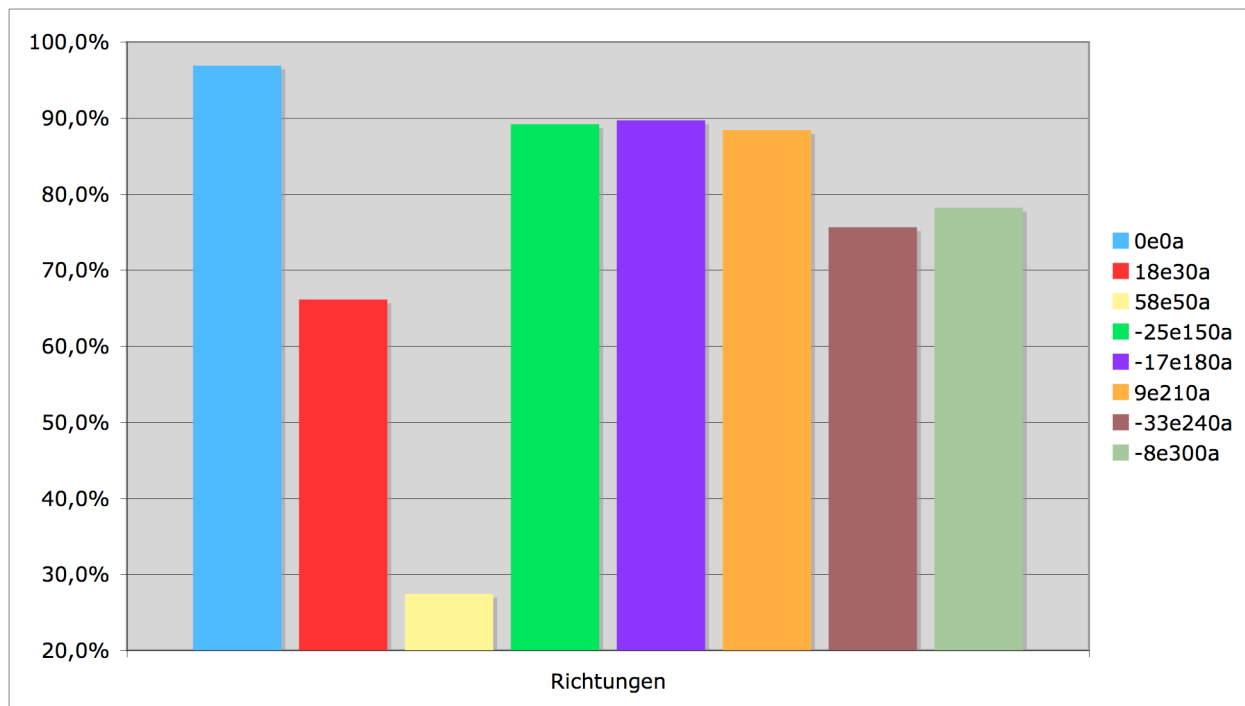


Abb. 16: Ergebnis der Hörbarkeit des Torsoeinflusses für verschiedene Richtungen

¹⁶ ϑ ... Azimut, φ ... Elevation, δ ... Kopf zu Schulter Winkel

¹⁷ e ... Elevation, a ... Azimut.

Für eine genauere Betrachtung werden in Abb. 8 nur die Ergebnisse der Hörbarkeit des dynamisch veränderten Torsos dargestellt.

Hierbei ist erstaunlich, dass für eine Torsodrehung von 200 ms und 400 ms pro 10° die Wahrnehmungsschwelle bei 7 der 8 Richtungen überschritten wird, wo hingegen dies für 800 ms pro 10° nur bei 5 Richtungen geschieht. Das bedeutet, die Möglichkeit den Torsoeinfluss wahrzunehmen ist nicht nur von der energetischen Differenz, sondern auch von der Geschwindigkeit der Kopfdrehung abhängig.

Dies lässt die Vermutung zu, dass der Torso nicht nur bei statischem Verhalten einer Person die Lokalisation beeinflusst, sondern speziell bei raschen Bewegungen des Kopfes relativ zum Torso wahrnehmbar wird. Dies kann zum Beispiel beim Betreten eines Raumes geschehen.

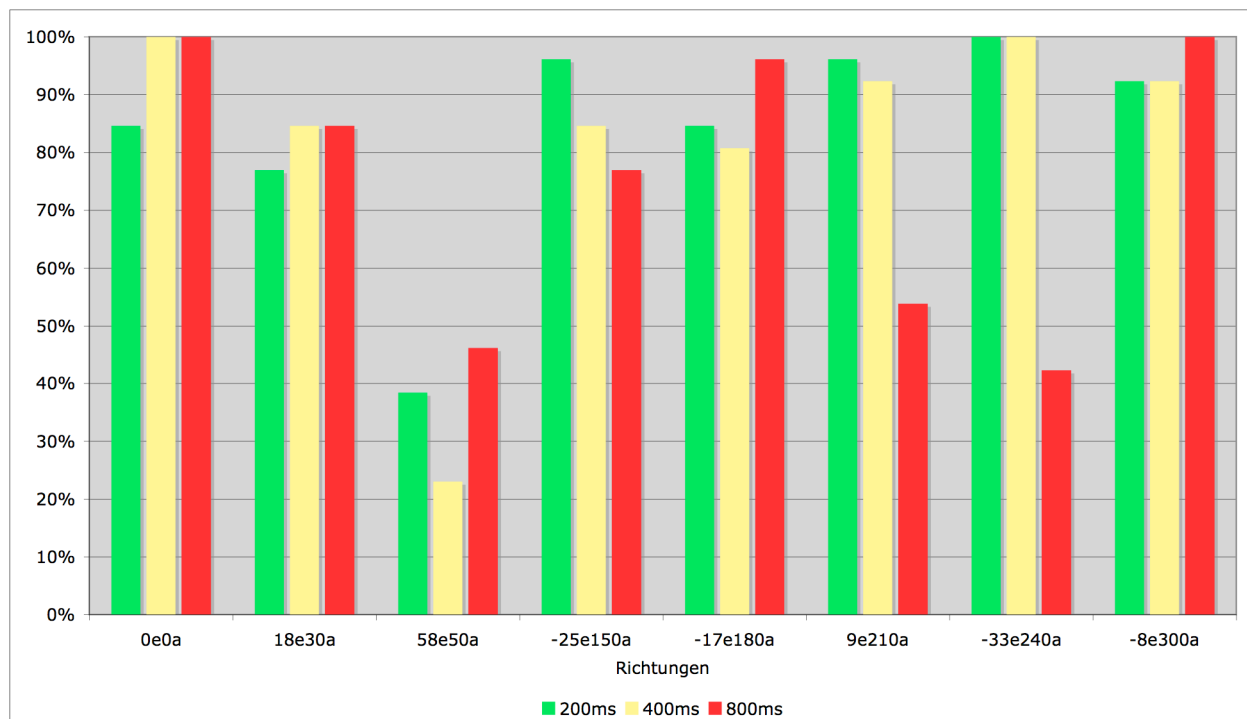


Abb. 17: Ergebnis der Hörbarkeit des Torsoeinflusses für dynamische Torsodrehungen

Im Folgenden wird die Hörbarkeit des Torsoeinflusses bei dynamischer Torsodrehung mit jener bei umschalten zwischen zwei statischen Torsopositionen verglichen und in Abb. 18 dargestellt. Die Ergebnisse für 200 ms und 400 ms pro 10° sind darin zusammengefasst und gemittelt.

Es zeigt sich erneut, dass bei zwei Richtungen die Veränderungen bei dynamischer Torsodrehung wahrnehmbar sind, das Umschalten zwischen zwei statischen Torsopositionen jedoch unter die Wahrnehmungsschwelle fällt. Dies bestärkt die Annahme, dass die Wahrnehmbarkeit der Torsodrehung mit der Geschwindigkeit zusammenhängt. (18e30a, -8e300a)

Erstaunlich auffallend sind jedoch zwei Richtungen in welchen die Veränderungen beim Umschalten zwischen zwei statischen Torsopositionen sowie auch die dynamische Torsodrehung von 200 ms und 400ms pro 10° gut wahrgenommen werden können. Die Veränderungen bei 800ms pro 10° fallen jedoch deutlich unter die Wahrnehmungsschwelle. (9e210a, -33e240a)

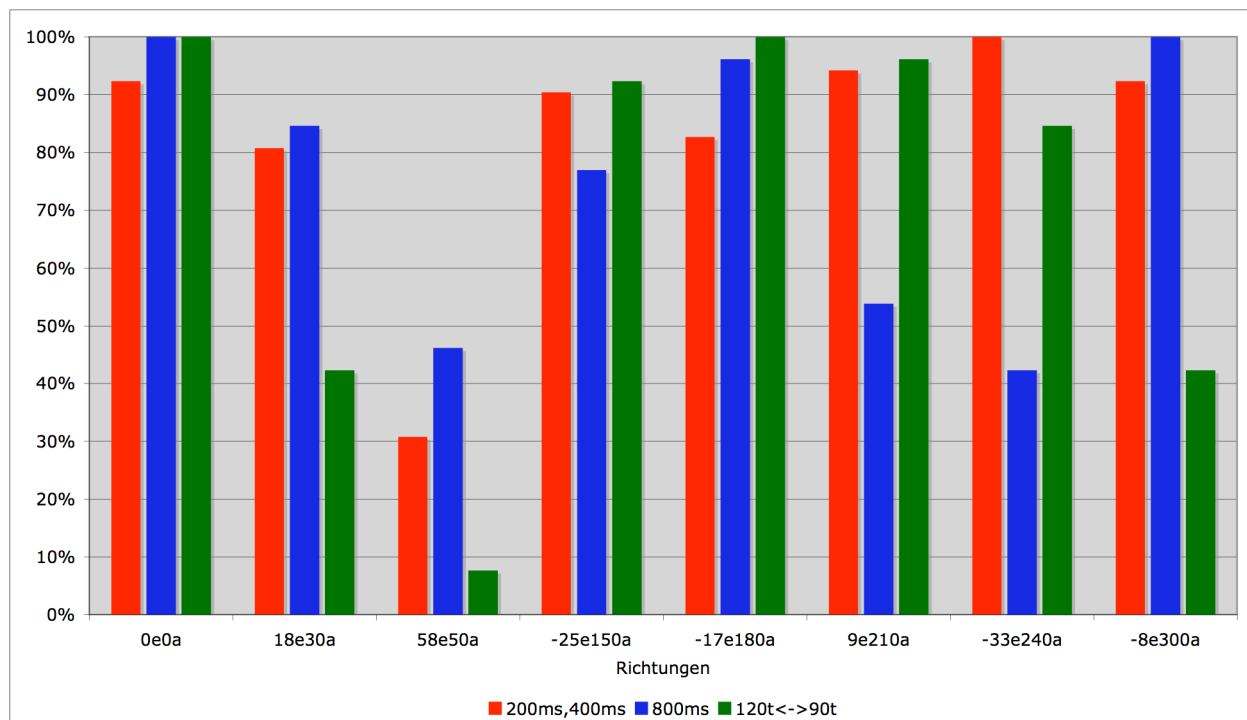


Abb. 18: Ergebnis der Hörbarkeit des Torsoeinflusses für dynamische und statische Torsodrehungen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Leider hat sich das Modell aus [1] nicht bewähren können. Es wäre jedoch interessant, es noch einmal mit einer anderen energetischen Grenze anzusetzen, denn der Ansatz birgt einen praktischen Vorteil. Der Einfluss des Torsos, zwischen 0° bis 350° , kann mit nur 6 Kurven mit je 22 Samples nachgebildet werden. Dadurch ist die Implementierung sehr recheneffizient und die Anzahl der Messungen wird reduziert.

Der Hörversuch anhand der gemessenen HTRIRs hat gezeigt, dass der Torso einen Einfluss auf die Hörwahrnehmung hat und dass neben der energetischen Differenz auch die Dynamik der Schulterdrehung eine Rolle spielt. Im nächsten Schritt wäre es interessant zu klären, in welchem Zusammenhang die energetische Differenz und die Dynamik der Schulterdrehung zur Lokalisation stehen und ob der Torso bei der Fokussierung auf eine Quelle in einer Umgebung mit mehreren Quellen („Cocktailparty Effekt“) einen unterstützenden Einfluss hat.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Markus Guldenschuh, Untersuchung des Schultereinflusses auf HRIRs, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz 04.02.2008
- [2] IEM Report 38/06, Binaural-Ambisonic 4.Ordnung 3D-Raumsimulationsmodell mit ortsvarianten Quellen und Hörerin bzw. Hörer für PD., Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz Nov. 2006
- [3] Oppenheim, Schafer, Buck, Zeitdiskrete Signalverarbeitung, Pearson Studium, 2. überarbeitete Auflage, 2004
- [4] Bernhard Laback, Skriptum: Psychoakustik II, Schwerpunkt: Experimentelle Audiologie, Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaft, 3.Auflage Feb. 2006
- [5] Fang Chen, Localization of 3D-Sound Presented through Headphone – Duration of Sound Presentation and Localization Accuracy. J. Audio Eng. Soc., Vol. 51, No. 12, Dec 2003
- [6] Michael Perkmann, Entwurf und Durchführung eines Hörversuches zur Ortung und Lokalisation von Phantomschallquellen bei Elevation., Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz 26.04.2005