

Abschlussarbeit zum Toningenieurprojekt

Hörversuche zur Lokalisation bei verschiedenen Ambisonics-Dekodern

Matthias Frank

Graz, 25.09.2008

Betreuer:

DI Franz Zotter

Univ.-Ass. DI Dr. Alois Sontacchi



institut für elektronische musik und akustik



Abstract

Zur Reproduktion von periphonen Schallfeldern gibt es verschiedene Verfahren. Im IEM Cube kommt hauptsächlich Ambisonics zum Einsatz. Ein Vorteil von Ambisonics liegt darin, dass Encoder und Dekoder entkoppelt sind. So ist es möglich, ein bereits enkodiertes Signal durch die Wahl des Dekoders für die jeweilige Wiedergabesituation zu optimieren. In einem Hörversuch mit statistischer Auswertung werden einige Dekoder einander gegenüber gestellt und die Eigenschaften für zentrale und dezentrale Hörposition bestimmt. Die Ergebnisse werden dann mit den theoretischen Aspekten verglichen, um deren Korrelation zu untersuchen.

Im Zuge dieses Projektes wird ein dreidimensionales Zeiger-Trackingsystem entwickelt, welches auch in weiteren Lokalisationsversuchen zum Einsatz kommen soll.

There are different ways for reproduction of periphonic sound fields. Ambisonics is the method that is mainly used in the IEM Cube. An advantage of this method is the decoupling of encoder and decoder. That allows us to optimize any encoded signal for every playback situation by the choice of the decoder. Different decoders will be compared concerning their qualities for sweet spot and off sweet spot positions. Finally, the results will be compared to the theoretical aspects to analyse their correlation. In the course of this project, a three dimensional pointer tracking system will be developed, that is to be used in further localization tests.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ambisonics	2
2.1	Herleitung	2
2.2	Encoder	3
2.3	Dekoder	3
2.4	spezielle Dekoder	3
3	Versuchsplanung	6
3.1	Anforderungen	6
3.2	Messsystem	6
3.2.1	Zeigegerät	6
3.2.2	Messprogramm	7
3.2.3	Aufbau	9
3.2.4	Performance	10
3.3	Versuchsablauf	11
3.3.1	erster Vorversuch	11
3.3.2	zweiter Vorversuch	13
3.3.3	finaler Versuchsablauf	14
4	Auswertung	16
4.1	MatLab: ANOVA1	16
4.1.1	Varianzanalyse	16
4.1.2	Boxplot	17
4.1.3	Beispiel	18
4.2	Bubbleplot	20
4.3	Mean Opinion Score	20
5	Ergebnisse	21
5.1	Zuverlässigkeit der Probanden	21
5.1.1	innerhalb des Sweetspots	21
5.1.2	außerhalb des Sweetspots	22
5.2	reale Quellen	24
5.3	Einfluss der Dekoder-Ordnung	25
5.4	Einfluss der Delaykompensation	26
5.4.1	innerhalb des Sweetspots	26
5.4.2	außerhalb des Sweetspots	27
5.5	Unterscheidbarkeit der Richtung	28
5.5.1	innerhalb des Sweetspots	28
5.5.2	außerhalb des Sweetspots	33

5.6	Vergleich der Dekoder 5. Ordnung	38
5.6.1	innerhalb des Sweetspots	38
5.6.2	außerhalb des Sweetspots	39
6	Zusammenfassung und Ausblick	40

1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist die Evaluierung der Lokalisationseigenschaften verschiedener horizontaler 2D Ambisonics-Dekoder für zentrale (Sweetspot) und dezentrale Hörpositionen anhand von Hörversuchen. Es werden neben den verschiedenen Dekodern auch verschiedene Ambisonics-Ordnungen, sowie der Einfluss der Kompensation geometriebedingter Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Lautsprechern untersucht. Zur Beurteilung werden einerseits die Lokalisationsfehler (Differenz zwischen wiedergegebener und angezeigter Richtung) und andererseits die subjektive Bewertung der Lokalisationsschärfe herangezogen. Im Zuge des Projektes wird ein dreidimensionales Zeiger-Trackingsystem entwickelt, das die gezeigte Richtung im zentralen Koordinatensystem unabhängig von der Position des Probanden bestimmt und die Genauigkeitsanforderungen für Hörversuche erfüllt. Dieses System wird auch für weitere Versuche eingesetzt werden und lässt sich leicht an andere geometrische Bedingungen anpassen. Als Raum für die Messungen wird der "Cube" am Instituts für Elektronische Musik und Akustik an der Universität für Musik und darstellende Kunst in Graz genutzt. Die akustische Beschaffenheit des Wiedergaberaumes unterscheidet sich stark von den sonst üblichen schalltoten Räumen und erlaubt Aussagen über die Lokalisationseigenschaften unter realen Hörbedingungen in normalen Räumen ("Wohnzimmer-tauglichkeit"). Die Planung der Hörversuche besteht aus mehreren Phasen mit Vorversuchen, anhand deren Ergebnisse über den finalen Versuchsablauf entschieden wird. Dabei gilt es, mit der begrenzten Zeit und Probandenanzahl möglichst gute Ergebnisse zu erreichen.

2 Ambisonics [1]

Ambisonics ist ein mehrkanaliges Aufnahme- und Wiedergabesystem zur Reproduktion von dreidimensionalen Schallfeldern über Lautsprecher. Es handelt sich dabei um ein globales Panning, d.h. es werden immer alle Lautsprecher gemeinsam verwendet.

Der Ambisonics-Ansatz basiert auf dem Vergleich zwischen einer Referenzwelle (aufgenommenes Schallfeld) und der reproduzierten Welle des Systems. Die verglichenen Wellenfronten werden als ebene Wellen angenommen. Diese Annahme gilt als erfüllt, wenn die aufgenommene Schallquelle und die Lautsprecher der Wiedergabeanordnung weit genug vom Zuhörer entfernt sind. Da in den Hörversuchen dieser Arbeit nur eine horizontale Lautsprecheranordnung benutzt wird, beschränkt sich die folgende Analyse auf den zweidimensionalen Fall.

2.1 Herleitung

Trifft eine ebene Welle (Referenzwelle) der Frequenz ω aus Richtung ψ ein, so kann sie in einem beliebigen Punkt (r, φ) durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$p_{ref}(r, \varphi) = \hat{p}_\psi \cdot e^{j\mathbf{k}^T \mathbf{r}} = \hat{p}_\psi \cdot e^{jkr \cdot \cos(\varphi - \psi)}. \quad (1)$$

Dabei ist \hat{p}_ψ die Amplitude des Schalldrucks der ebenen Welle, k die Wellenzahl $\frac{\omega}{c}$. Der Vektor \mathbf{k} repräsentiert eine Welle mit der Wellenzahl k , die unter dem Winkel ψ eintritt.

Die Gesamtschallwelle des Ambisonics-Systems ergibt sich als Superposition der (ebenen) Teilwellen der L einzelnen Lautsprecher mit dem Schalldruck \hat{p}_l und dem Winkel ψ_l . Für jede einzelne Teilwelle gilt:

$$p_l(r, \varphi) = \hat{p}_l \cdot e^{j\mathbf{k}_l^T \mathbf{r}} = \hat{p}_l \cdot e^{jkr \cdot \cos(\varphi - \psi_l)}, \quad (2)$$

die Gesamtschallwelle ergibt sich zu:

$$p_{ambi}(r, \varphi) = \sum_{l=1}^L p_l(r, \varphi) = \sum_{l=1}^L \hat{p}_l \cdot e^{j\mathbf{k}_l^T \mathbf{r}} = \sum_{l=1}^L \hat{p}_l \cdot e^{jkr \cdot \cos(\varphi - \psi_l)}. \quad (3)$$

Um die geforderte Äquivalenz $p_{ref}(r, \varphi) = p_{ambi}(r, \varphi)$ zu erhalten, werden die ebenen Wellen in Bessel-Fourierreihen entwickelt. Die Gleichheit beider Wellen führt zu folgendem Gleichungssystem (ohne Herleitung):

$$\begin{aligned} \hat{p}_\psi \cdot \cos(m\psi) &= \sum_{l=1}^L \hat{p}_l \cdot \cos(m\psi_l) \\ \hat{p}_\psi \cdot \sin(m\psi) &= \sum_{l=1}^L \hat{p}_l \cdot \sin(m\psi_l) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\forall m \in \mathbb{N}_0 | m \leq M$$

Die Reihen besitzen unendlich viele Elemente, die in der Praxis nur bis zu einem bestimmten Grad M , der Ambisonics-Ordnung, approximiert werden. Je größer M , desto genauer wird die Referenzquelle nachgebildet.

Die Terme auf der linken Seite der Gleichungen stellen die Ambisonics-Signale dar. Diese führen zur Vorschrift für den Enkoder.

2.2 Encoder

Zum Enkodieren einer Quelle in Ambisonics wird der Schalldruck \hat{p}_ψ einfach mit den Winkeltermen bis zur Ordnung M multipliziert (der Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ bei der nullten Ordnung wird aus energetischen Gründen eingebracht):

$$\mathbf{b} = \hat{p}_\psi \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, \cos(\psi), \sin(\psi), \cos(2\psi), \sin(2\psi), \dots, \cos(M\psi), \sin(M\psi) \right]^T \quad (5)$$

Dadurch ergeben sich $2M + 1$ Übertragungskanäle.

2.3 Dekoder

Schreibt man das Gleichungssystem 4 in Matrixschreibweise um, so erhält man:

$$\mathbf{b} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{s} \quad (6)$$

wobei \mathbf{b} das Ambisonics-Signal und \mathbf{s} die Signale der L einzelnen Lautsprecher darstellt. Die Matrix \mathbf{C} enthält die Reihenentwicklung für die Lautsprecher entsprechend ihrer Positionen:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cos(\psi_1) & \cos(\psi_2) & \dots & \cos(\psi_L) \\ \sin(\psi_1) & \sin(\psi_2) & \dots & \sin(\psi_L) \\ \cos(2\psi_1) & \cos(2\psi_2) & \dots & \cos(2\psi_L) \\ \sin(2\psi_1) & \sin(2\psi_2) & \dots & \sin(2\psi_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos(M\psi_1) & \cos(M\psi_2) & \dots & \cos(M\psi_L) \\ \sin(M\psi_1) & \sin(M\psi_2) & \dots & \sin(M\psi_L) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Da die Matrix \mathbf{C} im Allgemeinen weder orthogonal noch quadratisch ist, muss zur Bestimmung der Lautsprechersignale \mathbf{s} die Pseudoinverse \mathbf{D} bestimmt werden:

$$\mathbf{D} = \text{pinv}(\mathbf{C}) = \mathbf{C}^T \cdot (\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T)^{-1} \quad (8)$$

Mit Hilfe dieser Dekodermatrix \mathbf{D} erhält man nun die Signale für die einzelnen Lautsprecher aus den Ambisonics-Signalen:

$$\mathbf{s} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{b} \quad (9)$$

2.4 spezielle Dekoder

Der in Abschnitt 2.3 vorgestellte Dekoder trägt auch den Namen "Basic"-Dekoder, da er sich aus der Herleitung des Ambisonics-Systems direkt ergibt. Dieser Dekoder ist für zentrale Hörposition (Sweetspot) gedacht. Um die Lokalisation außerhalb des Sweetspots zu verbessern, wurden andere Dekoder entwickelt, bei denen eine Gewichtung der verschiedenen Harmonischen durchgeführt wird. Die Gewichte g_m werden in einer Diagonalmatrix $\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{gM}}$ zusammengefasst. Die neue Dekodermatrix $\mathbf{D}_{\mathbf{gM}}$ ergibt sich durch Multiplikation der Basic-Dekodermatrix \mathbf{D} mit der Diagonalmatrix:

$$\mathbf{D}_{\mathbf{gM}} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{\Gamma}_{\mathbf{gM}} \quad (10)$$

$$\mathbf{\Gamma}_{\mathbf{gM}} = \text{Diag}([g_0 \ g_1 \ g_1 \ g_2 \ g_2 \ \dots \ g_M \ g_M]) \quad (11)$$

Durch eine Abnahme der Gewichte zu höheren Harmonischen hin (siehe Tabelle 1) wird versucht, die räumlichen Nebenkeulen zu unterdrücken. Dadurch wird jedoch die räumliche Hauptkeule breiter (siehe Abbildung 1), was eine Verbreiterung der virtuellen Quelle, also eine reduzierte Lokalisationsschärfe, mit sich bringt.

In dieser Arbeit werden neben dem Basic-Dekoder noch zwei weitere Dekoder verwendet; Max r_E und Inphase.

Max r_E

Dieser Dekoder maximiert den Energievektor in der gewünschten Richtung ψ . Die Gewichte für die einzelnen Harmonischen werden für eine Ordnung M wie folgt berechnet (Herleitung siehe [1]):

$$g'_m = \cos\left(\frac{m\pi}{2M+2}\right) \quad (12)$$

Es gilt: $g_m = g_0 g'_m$. Für die Erhaltung der Amplitude im Sweetspot ist $g_0 = 1$. Zur Erhaltung der Gesamtenergie ist $g_0 = \sqrt{\frac{L}{M+1}}$ mit $L = \text{Anzahl der Lautsprecher}$.

Inphase

Der Inphase-Dekoder führt zu einer kompletten Unterdrückung der Nebenkeulen durch sehr kleine Gewichte für die hohen Harmonischen. Das hat allerdings eine sehr breite Hauptkeule zur Folge. Die Gewichte für eine Ordnung M lassen sich folgendermaßen berechnen [1]:

$$g'_m = \frac{M!^2}{(M+m)!(M-m)!} \quad (13)$$

Es gilt wieder: $g_m = g_0 g'_m$. Für die Erhaltung der Amplitude im Sweetspot ist $g_0 = 1$. Zur Erhaltung der Gesamtenergie ist $g_0 = \sqrt{\frac{L(2M+1)}{(M+1)^2}}$.

Um die Lautstärke bei allen Dekodern im Sweetspot möglichst gleich zu halten, wurde die Gewichtung zum Erhalt der Amplitude mit $g_0 = 1$ verwendet.

Dekoder	Ordnung M	Gewichte g'_m
Basic	1	1
Basic	2	1, 1
Basic	3	1, 1, 1
Basic	4	1, 1, 1, 1
Basic	5	1, 1, 1, 1, 1
Max r_E	1	0.707
Max r_E	2	0.866, 0.500
Max r_E	3	0.924, 0.707, 0.383
Max r_E	4	0.951, 0.809, 0.588, 0.309
Max r_E	5	0.966, 0.866, 0.707, 0.500, 0.259
Inphase	1	0.500
Inphase	2	0.667, 0.167
Inphase	3	0.750, 0.300, 0.050
Inphase	4	0.800, 0.400, 0.114, 0.014
Inphase	5	0.833, 0.476, 0.179, 0.040, 0.004

Tabelle 1: Gewichtungen der Dekoder

In Tabelle 1 erkennt man deutlich die kleinen Gewichte bei den hohen Harmonischen. Beim Inphase-Dekoder sind die Gewichte am kleinsten. In Abbildung 1 sind die Richtcharakteristiken der einzelnen Dekoder für verschiedene Ordnungen dargestellt.

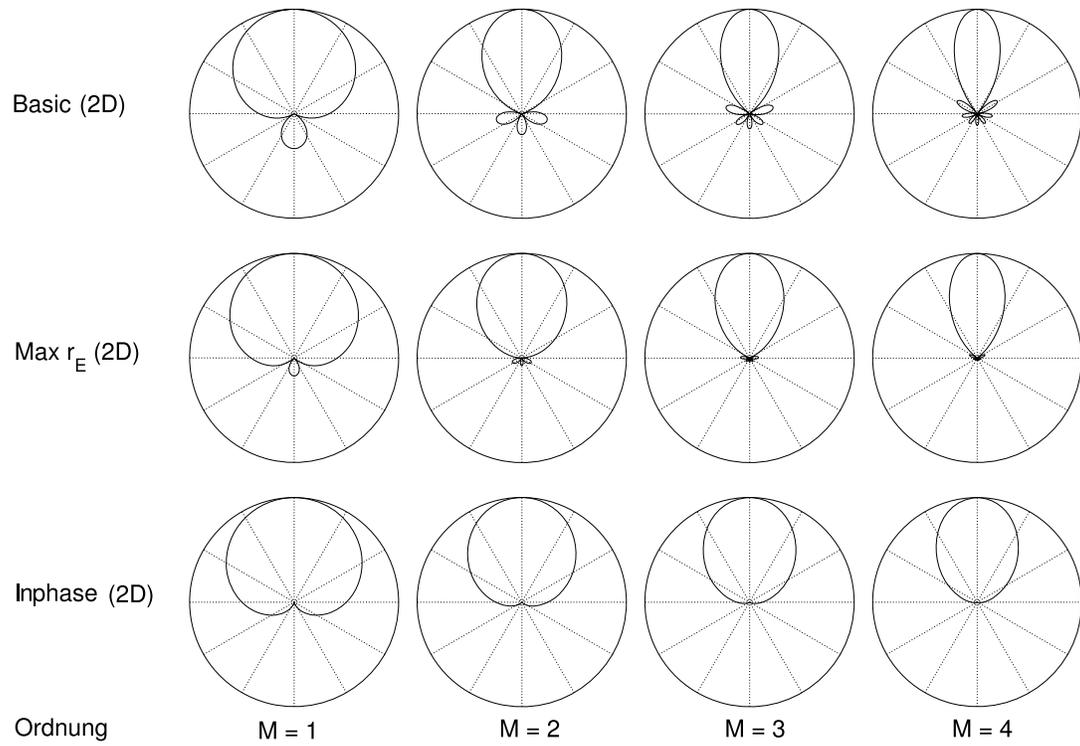


Abbildung 1: Einfallsscharakteristiken von Ambisonics-Schallfeldern mit unterschiedlichen Dekodern nach Daniel [1]

3 Versuchsplanung

3.1 Anforderungen

Zum Messen der wahrgenommenen Richtung wird ein Zeigegerät benutzt. Wichtig ist dabei vor allem die Genauigkeit der Messmethode. Aus der Literatur [2] ist bekannt, dass die Lokalisationsgenauigkeit des Menschen, je nach Signal und Richtung, bestenfalls 1° beträgt. Um die Messwerte nicht zu verfälschen, muss das Messsystem mindestens die selbe Genauigkeit besitzen.

Um die Lokalisationseigenschaften der dargebotenen Stimuli zu beurteilen, ist es sinnvoll, neben dem Anzeigen der wahrgenommenen Richtung auch eine Bewertung der empfundenen Lokalisationsschärfe aufzunehmen. Es besteht nicht immer ein Zusammenhang zwischen der Abweichung der gezeigten von der wiedergegebenen Richtung und der subjektiven Bewertung der Lokalisationsschärfe. Die Bewertung der Lokalisationsschärfe durch den Probanden erfolgt auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 die schlechteste und 5 die beste Lokalisationsschärfe bedeutet. Die Bewertung soll unabhängig von den klanglichen Eigenschaften der Stimuli sein.

3.2 Messsystem

3.2.1 Zeigegerät

Da die Effizienz bei psychoakustischen Versuchen stark von der Vertrautheit der Probanden mit der Situation abhängt, wurde ein Zeigegerät entwickelt, das ein besonders intuitives Handling bietet: Seit Jahrhunderten hat sich die Pistole als ein äußerst präzises und einfach zu bedienendes "Zeigegerät" bewährt. Um die Ergonomie weiter zu erhöhen, wurde das Interface für die Bewertung der Lokalisationsschärfe in das Zeigegerät integriert.



Abbildung 2: Zeigegerät: Fernbedienung mit Pistolenaufsatz und Reflektoren

Als praktikable Lösung stellte sich die Wiimote von Nintendo (eine Fernbedienung) mit Pistolenaufsatz (siehe Abbildung 2) heraus. Außerdem gab es am Institut bereits ein Patch zur Kommunikation mit PD (einer grafischen, auf C basierenden Echtzeitprogrammiersprache) via Bluetooth. Da die eingebauten Beschleunigungssensoren der Fernbedienung keine brauchbare Genauigkeit lieferten, wurde die

Pistole von einem Infrarot Positionserfassungs- und Trackingsystem (VICON) mit 15 Kameras getrackt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, den eingebauten Laser als Zielhilfe zu benutzen.

3.2.2 Messprogramm

Das Messprogramm wurde komplett in PD programmiert, um eine möglichst gute Echtzeitfähigkeit zu erlangen. Seine Hauptaufgabe ist die Berechnung der gezeigten Richtung in Bezug zum Zentrum der Lautsprecheranordnung, da dieses auch den Bezugspunkt für die Winkel bei der Enkodierung der virtuellen Quellen darstellt. Vom Trackingsystem werden die Koordinaten und die Eigendrehwinkel der Pistole geliefert. Um den gewünschten Winkel zu erhalten wird die Pistolenausrichtung auf eine Oberfläche projiziert.

Die einfachste Möglichkeit dazu ist die Annahme einer Kugeloberfläche. Leider entspricht die von der Lautsprecheranordnung gebildete Oberfläche nicht einer Kugel. Deshalb wird die virtuelle Oberfläche aus Lautsprecherdreiecken gebildet (siehe Abbildung 3). Im Rahmen des Projekts wurde die Messung der Lautsprecherpositionen vom Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der TU Graz mit einer Ungenauigkeit von maximal $5mm$ übernommen. Um Ausfälle des Messsystems bei zu tiefem Zielen (unterhalb der Zentren der Lautsprecher des unteren Ringes) zu vermeiden, wurde ein zusätzlicher virtueller Lautsprecherring (Lautsprecher 25-32) zur Bildung der Oberfläche einbezogen. Dieser Ring ergibt sich aus der Spiegelung des mittleren Ringes (Lautsprecher 13-20) am untersten (Lautsprecher 1-12).

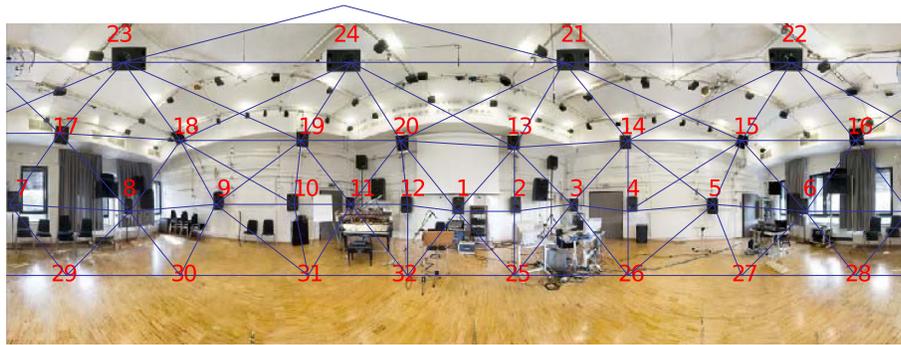


Abbildung 3: Bildung der Oberfläche aus Lautsprecherdreiecken

In Abbildung 4 ist der Algorithmus zur Berechnung des gezeigten Winkels in Bezug auf den Mittelpunkt der Lautsprecheranordnung abgebildet. Zur Berechnung werden einerseits die Koordinaten und Ausrichtung des Zeigegeräts und andererseits die Geometrie der Oberfläche (definiert durch die Positionen und die Dreieckskombinationen zwischen benachbarten Lautsprechern) herangezogen. Durch diesen modularen Aufbau kann das Programm auch in anderen Räumen und mit anderen Trackingsystemen (z.B. Flock of Birds) benutzt werden.

Zur Glättung der Eingangsdaten bzw. als Verwacklungsschutz stehen verschiedene Filter zur Auswahl. In Vorversuchen stellte sich ein Medianfilter, der über 11 Werte glättet und gleichzeitig die Datenrate (von ca. $120fps$) um den Faktor 11 reduziert, als passend heraus. Die daraus resultierende Reaktionszeit des Systems von ca. $100ms$ ist ausreichend. Alle Berechnungen nach dem Filter werden hier stellvertretend für einen Taktzyklus (Datenrate nach dem Filter) erklärt.

Aus der Position P und der Ausrichtung g_0 des Zeigegeräts wird eine Gerade gebildet: $g = P + \mu \cdot g_0$. Dann werden die Abstände $d(LS_i, g) = |(LS_i - P) \times g_0|$ zwischen der Gerade g und jedem Lautsprecher LS_i berechnet und mit aufsteigender Größe gereiht. Zur weiteren Berechnung sind zwei verschachtelte Schleifen notwendig: Die äußere durchläuft die nach dem Abstand zur Gerade g geordneten Lautsprecher LS_i , die innere alle Dreiecke Δ_{ijk} , die der jeweilige Lautsprecher LS_i mit den benachbarten LS_j und LS_k bildet. Innerhalb dieser Schleife wird der Durchstoßpunkt der Gerade g durch die von den

3 Lautsprechern LS_i , LS_j und LS_k gebildete Ebene berechnet. Für diesen Punkt gilt die Gleichung $P + \mu \cdot g_0 = LS_i + \alpha(LS_j - LS_i) + \beta(LS_k - LS_i)$. Nun sind folgende Fälle möglich:

1. $\mu \leq 0$: Die Gerade zeigt in die falsche Richtung. Dies kann eintreten, wenn ein Lautsprecher in entgegengesetzter Zeigerichtung näher an der Geraden liegt als ein Lautsprecher in Zeigerichtung. In diesem Fall wird die innere Schleife unterbrochen und die äußere wählt den nächsten Lautsprecher (mit größerem Abstand zur Geraden) aus.

2. $\mu > 0$: Der ausgewählte Lautsprecher liegt in Zeigerichtung. Jetzt muss noch das richtige Dreieck um diesen Lautsprecher bestimmt werden.

2.1. $0 \leq \alpha, \beta \wedge \alpha + \beta \leq 1$: Der Durchstoßpunkt liegt im Dreieck Δ_{ijk} . Alle Schleifen werden abgebrochen und der Punkt zwischengespeichert.

2.2. Wenn die vorherige Bedingung nicht erfüllt wird, liegt der Durchstoßpunkt nicht im aktuellen Dreieck. Deshalb wird die zweite Schleife weiter durchlaufen (d.h. das nächste Dreieck um den selben Lautsprecher ausgewählt), bis die Bedingung erfüllt wird.

Für den Fall, dass die Ebene /das Dreieck um den Lautsprecher nahezu parallel zur Zeigerichtung liegt, kann es vorkommen, dass die zweite Schleife erfolglos bleibt. So muss die äußere Schleife den nächsten entfernteren Lautsprecher auswählen.

Der gefundene Durchstoßpunkt wird nun in sphärische Koordinaten umgerechnet. Die Azimut- bzw. Elevationswinkel können so direkt abgelesen werden.

Dieser Algorithmus hat sich als zielführend erwiesen und benötigt in der Mehrzahl der Fälle nur sehr wenige Schleifendurchläufe.

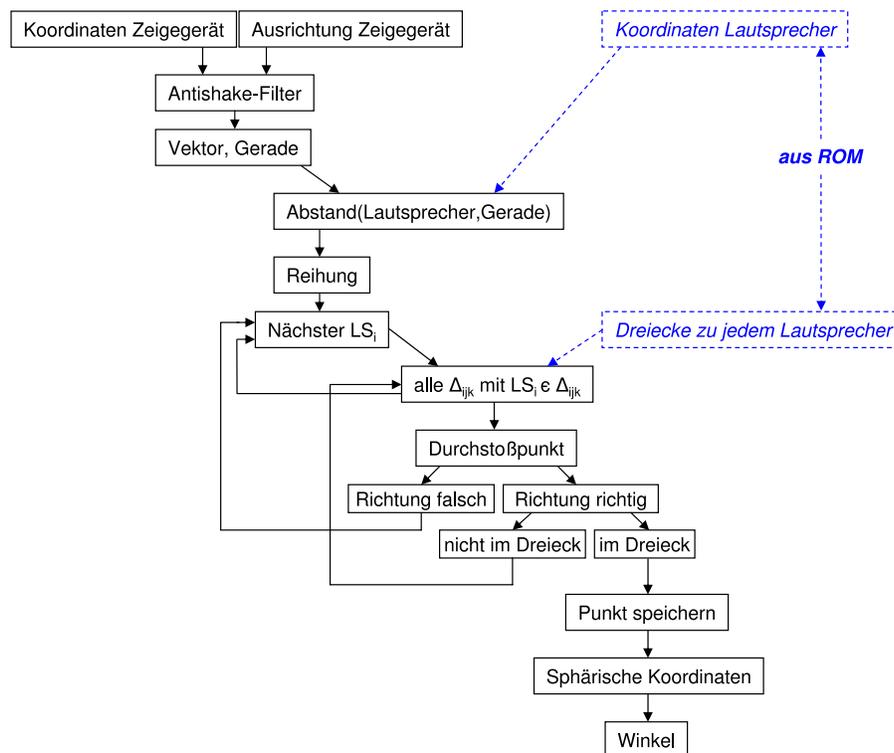


Abbildung 4: Algorithmus zur Berechnung des gezeigten Winkels

Die Berechnung des gezeigten Winkels geschieht in Echtzeit und wird im Messprogramm durchgehend angezeigt. Durch Betätigen des Abzugs wird der aktuelle Wert festgehalten. Dieser wird anschließend zusammen mit der abgegebenen Bewertung der Lokalisationsschärfe gespeichert. Das Programm übernimmt auch das gesamte File-Handling für die Messdaten und liefert akustische sowie optische Feedbacks für Proband und Versuchsleiter. Zu diesen zählt auch das Warnen beim Verlassen der zugelassenen Kopfposition des Probanden (siehe Abschnitt 3.2.3).

3.2.3 Aufbau

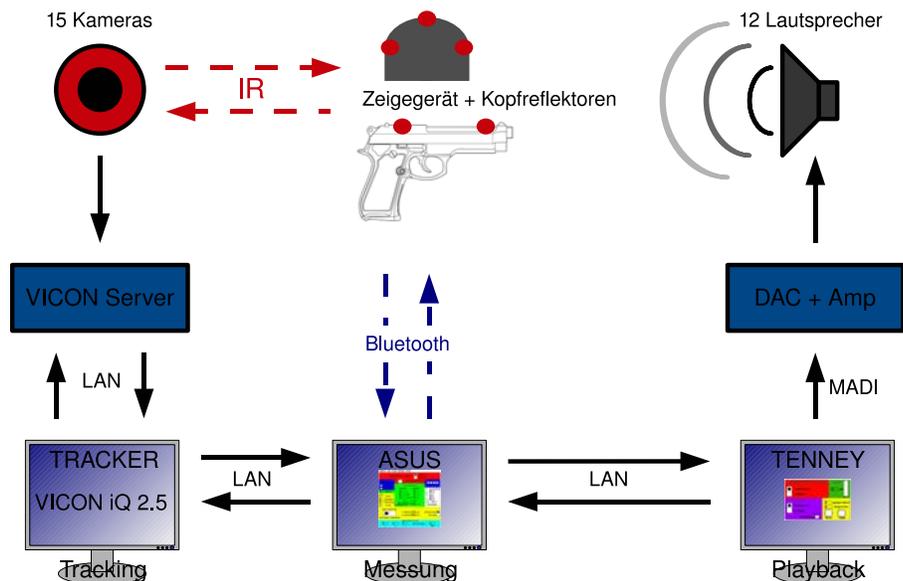


Abbildung 5: Aufbau des Messsystems

In Abbildung 5 ist der schematische Aufbau des gesamten Messsystems dargestellt. Der PC "Asus" ist dabei der Knotenpunkt, auf dem das Messprogramm läuft und an dem der Versuchsleiter den Ablauf steuert. Er ist über Bluetooth mit der Pistole verbunden, um den Abzugzeitpunkt und die Bewertungen zu erhalten. Auf diesem Weg werden auch die LEDs zur Statusanzeige des Zeigegerätes und der Vibrationsalarm beim Verlassen des zulässigen Kopfbereichs gesteuert. Der Computer ist über Netzwerk mit zwei weiteren Computern verbunden:

Auf dem PC "Tenney" läuft das Programm zur Wiedergabe der Klangbeispiele. Er ist wiederum über MADi mit den Digital/Analogkonvertern (RME ADI 8) verbunden, die das Signal an die Endstufen und letztendlich an die 12 Lautsprecher (Tannoy System 1200) weiterleiten. Die Austellung der Lautsprecher sowie die beiden Hörpositionen der Probanden sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Daten des Trackingsystems erhält das Messprogramm über den "Tracker". Darauf läuft die zum Kamerasystem gehörende Software VICON iQ 2.5. Dort werden die Objekte (Zeigegerät und Kopfretektoren) durch die Positionen der angebrachten Infrarot-Reflektoren definiert, damit sie durch die Reflexionen vom System erkannt werden können. Der "Tracker" ist wiederum mit dem VICON-Server verbunden, der aus den Signalen der 15 Kameras die Positionen und Ausrichtungen der Objekte berechnet.

Als Raum für die Messungen wurde der "Cube" des Instituts für Elektronische Musik und Akustik an der KU Graz benutzt. Der ca. $10m \times 12m \times 4m$ große Mehrzweckraum ist mit einer Nachhallzeit T_{60} von breitbandig $< 1s$ auf Sprache hin ausgerichtet. Es handelt sich also keineswegs um einen schalltoten Raum, wie er meistens bei Hörversuchen benutzt wird, sondern eher um eine natürliche Abhörbedingung, die Aussagen über die "Wohnzimmertauglichkeit" der Systeme zulässt.

Eine Verhüllung der Lautsprecher war im zeitlichen Rahmen des Projektes nicht möglich, wodurch vom Vergleich mit realen Schallquellen keinen neuen Erkenntnisse zu erwarten sind. Außerdem besteht die Gefahr, dass das Schallereignisse eher den sichtbaren Lautsprechern zugeordnet werden.

Um die Positionen der Ohren aller Probanden möglichst gleich zu halten, wurde die Kopfposition überwacht. Die Höhe der Ohren wurde dabei auf die Höhe des akustischen Zentrums der Lautsprecher (1.34m) eingestellt. Es waren nur Änderungen vom maximal $\pm 5\text{cm}$ in alle drei Raumachsen zulässig, was einen Winkelfehler von $\pm 0.5^\circ$ auf der Oberfläche verursacht. Die Ausrichtung (durchgezogene grüne und blaue Linie in Abbildung 6) war für jede Hörposition in die 0° Richtung des Systems (Lautsprecher 1). So konnte die Benachteiligung der rechten Seite bei der Hörposition links vom Sweetspot minimiert werden. Eine Drehung des Kopfes war nur im Bereich von $\pm 10^\circ$ um die eingestellte Richtung erlaubt.

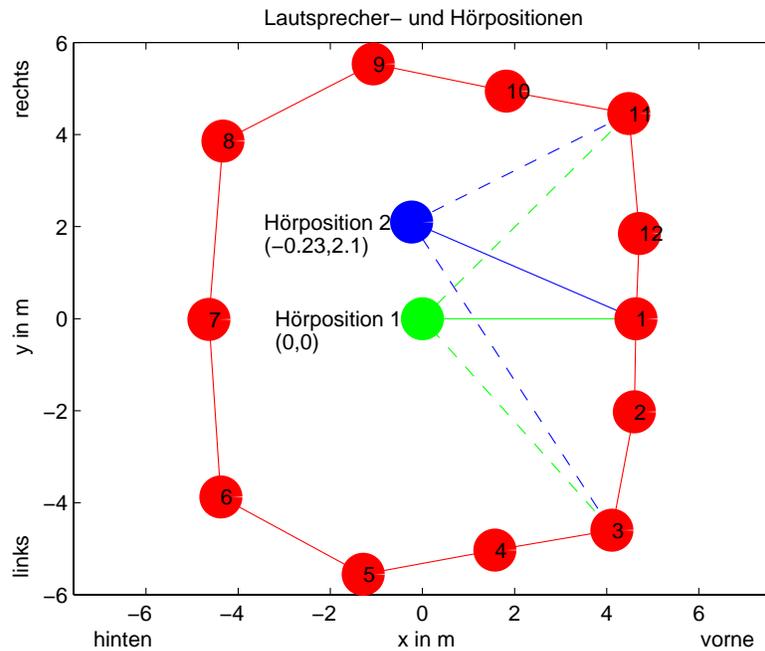


Abbildung 6: Lautsprecher- und Hörpositionen

3.2.4 Performance

Vor dem Einsatz des Messsystems wurde getestet, ob das System den Anforderungen entspricht. Dazu wurde von zwei Probanden auf drei fixe Raumpunkte (Lautsprecherzentren) gezielt. Jeder Punkt wurde auf drei verschiedene Arten dreimal anfixiert. Dabei wurde jeweils ohne Zuhilfenahme des Lasers mit dem linkem bzw. dem rechten Auge über Kimme und Korn und anschließend mit dem Laser gezielt. In Abbildung 7 ist der vorzeichenbehaftete Zeigefehler über beide Probanden und alle drei Punkte dargestellt.

Die rote Linie kennzeichnet jeweils den Median, der blaue Bereich enthält die Hälfte aller Messwerte, die um den Median liegen (Eine genaue Erklärung dieser Darstellungsform ist in Abschnitt 4.1.2 zu finden). Zwischen dem Zielen mit linkem oder rechtem Auge sind kaum Unterschiede zu erkennen. Das Zielen mit dem Laser hat jedoch einen Offset von ca. 2.5° . Da der blaue Bereich (er ist ein Maß für die Streuung) beim Laser kaum kleiner ist als beim Zielen ohne Laser, ist die Streuung um den Median auch kaum kleiner. In einigen Tests vor den Vorversuchen wurde auch eine Verwirrung der Probanden wegen des krassen Gegensatzes zwischen der optischen Schärfe des Lasers im Vergleich zur akustischen Abbildungsschärfe der virtuellen Quellen festgestellt. Aus diesen Gründen wurde der Laser bei den Hörversuchen abgeschaltet.

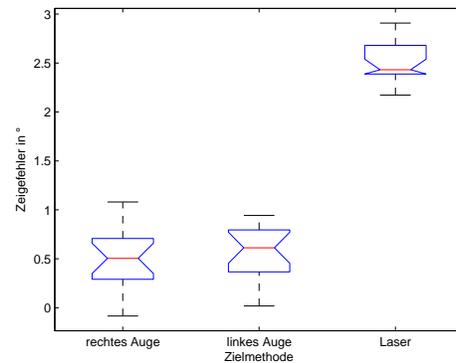


Abbildung 7: vorzeichenbehafteter Zeigefehler für verschiedene Zielmethoden

Der gesamte Messablauf, vom Zielen des Probanden, über das Tracking-System und die Berechnung des gezeigten Winkels, hat also insgesamt einen Messfehler von im Mittel ca. 0.5° . Der Fehler ist zwar einseitig, d.h. es wird im Mittel 0.5° zu weit nach links gezielt, aber aufgrund des geringen Betrages ist die geforderte Genauigkeit erfüllt.

3.3 Versuchsablauf

Um möglichst sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, den Versuchsablauf an die Fähigkeiten des menschlichen Gehörs anzupassen. Die Lokalisation in der Horizontalebene ist in 0° Richtung am besten und nimmt dann zu den Seiten hin (bei ca. 90° am schlechtesten) ab [2]. Deshalb wurden nur horizontale Winkel im Bereich von 40° um die 0° Richtung untersucht. In Anlehnung an andere Lokalisationsversuche [2, 3, 4] wurde als Stimulus gepulstes rosa Rauschen ($100ms$ Einfaden, $200ms$ stationär, $100ms$ Ausfaden, $100ms$ Pause) mit einer Gesamtdauer von $2s$ verwendet.

Die Versuchsdauer wurde an die Konzentrationsfähigkeit der Probanden angepasst. Als guter Richtwert ergab sich eine Unterteilung des Gesamtversuchs in zwei Hälften à 20 Minuten mit einer ca. zehnmütigen Pause dazwischen. Zur Abschätzung der Beispielanzahl muss man die Dauer pro Einzelmessung kennen. Da die Anzahl an Probanden auch begrenzt ist, es ist notwendig, vor der Durchführung des eigentlichen Versuchs die bestmöglichen Kombinationen von Dekoder, Ordnung, Winkeln zu ermitteln, um noch statistisch sinnvolle Aussagen treffen zu können. Aus diesen Gründen wurden zwei Vorversuche mit jeweils einem Probanden durchgeführt.

3.3.1 erster Vorversuch

Im ersten Vorversuch erhielt der Proband je 78 Beispiele für die beiden Messpositionen. Der Proband war bereits mit der Handhabung der Zielgerätes vertraut, sodass auf eine Zielübung verzichtet werden konnte. Die 78 Beispiele waren wie in Tabellen 2 zusammengesetzt. Die enkodierten Winkel (5 pro Kombination) wurden so gewählt, dass sie insgesamt gleichmäßig zwischen -40° und 40° lagen. Sie waren für alle Kombinationen unterschiedlich, die grobe Aufteilung war aber für alle gleich: einmal in 0° Richtung, jeweils einmal links und rechts nahe der 0° Richtung und jeweils einmal links und weiter außen. Die Abspielreihenfolge wurde zufällig gewählt und war unterschiedlich für die beiden Messpositionen. Vor dem Beginn der Messung an der jeweiligen Hörposition wurden 11 ausgewählte Beispiele an beiden Hörpositionen vorgespielt, um eine globale Basis für die Bewertung der Lokalisationschärfe zu bilden. Da die Lokalisation in verschiedenen Frequenzbereichen von verschiedenen Parametern (bis ca. $700Hz$ über die Richtung des Schallschnellektors; darüber über die Richtung des Energievektors) abhängt, wurden auch bei $700Hz$ tiefpass- bzw. hochpassgefilterte Rauschimpulse verwendet. Die Zeit für die Bewältigung der erste Versuchshälfte wurde mit 12:30 Minuten gemessen.

In diesem Versuch bestand das Trackingsystem nur aus 8 (bei den späteren Versuchen aus 15) Kameras.

Dekoder	Ordnung	Filterung	Winkel
Basic	1		5
Basic	3		5
Basic	5		5
Max r_E	1		5
Max r_E	3		5
Max r_E	5		5
Inphase	1		5
Inphase	3		5
Inphase	5		5
real			3
Basic	1	Tiefpass	2
Basic	5	Tiefpass	2
Max r_E	1	Tiefpass	2
Max r_E	5	Tiefpass	2
Inphase	1	Tiefpass	2
Inphase	5	Tiefpass	2
real		Tiefpass	3
Basic	1	Hochpass	2
Basic	5	Hochpass	2
Max r_E	1	Hochpass	2
Max r_E	5	Hochpass	2
Inphase	1	Hochpass	2
Inphase	5	Hochpass	2
real		Hochpass	3
GESAMT			78

Tabelle 2: Klangbeispiele beim ersten Vorversuch

Folgende Tendenzen waren in den Ergebnissen des ersten Vorversuchs erkennbar (siehe Abbildungen 47 und 48 im Anhang):

- Bei zunehmender Ordnung sinkt der Lokalisationsfehler und die Bewertung der Lokalisationsschärfe steigt.
- Die Bewertungen sind im Sweetspot etwas besser als außerhalb.
- Die Lokalisationsfehler sind im Sweetspot etwas geringer als außerhalb.
- Der Inphase-Dekoder liefert fast immer schlechtere Ergebnisse als Basic und Max r_E .
- Die verschiedene Filterung der Klangbeispiele zeigt keinen großen Effekt, wobei sich der Proband über störende Bodenreflexionen vorallem bei den hochpassgefilterten Signalen geäußert hat.
- Innerhalb von 12:30 Minuten wurden 78 Messungen durchgeführt; das sind weniger als 10 Sekunden pro Messung.
- Reale Quellen erhalten eine sehr gute Bewertung und werden genau getroffen, was auch mit der Sichtbarkeit der Lautsprecher zusammenhängt.

Daraus wurden folgende Schlüsse für die weitere Planung gezogen:

- Das Messsystem liefert brauchbare Werte.
- Die Anzahl an Klangbeispielen ist für die Probanden im gesetzten Zeitrahmen gut zu bewältigen.

- Wie erwartet ist das Handling des Zeigege­r­äts leicht beherrschbar.
- Die Untersuchung für verschieden gefilterte Signale entfällt. Dadurch entsteht Platz für zusätzliche Dekoder, Ordnungen oder Winkel.
- Die Bodenreflexionen sind zu verringern.

3.3.2 zweiter Vorversuch

Im zweiten Vorversuch wurden die Erkenntnisse aus dem ersten umgesetzt. Statt der gefilterten Signale kam ein weiterer Dekoder (im Folgenden "mixed" genannt), der frequenzabhängig (Trennfrequenz $1kHz$) zwischen Basic und Max r_E wechselt, zum Einsatz. Außerdem wurde die Auswirkung der Kompensation der geometriebedingten Laufzeit- und Pegelunterschiede untersucht. Alle 63 Beispiele (siehe Tabelle 3) wurden zweimal im Sweetspot getestet; einmal mit Laufzeitkompensation und einmal ohne. Die Messung außerhalb des Sweetspot (die Position entsprach relativ gut derjenigen aus dem ersten Vorversuch) war aus Zeitgründen leider nur einmal, mit Laufzeitkompensation, möglich. Bei allen Messungen war die Pegelkompensation durchgehend aktiv. Zwischen den drei Teilversuchen wurden auch wieder kurze Pausen eingelegt. Um die Bodenreflexionen zu verringern wurde ein mit ca. 25 Personen besetzter Zustand durch mit Bühnenmolton abgedeckte Stühle simuliert (siehe Abbildung 8). Ab diesem Zeitpunkt wurden die Kopfbewegungen der Probanden getrackt. Der Kopf des Probanden durfte sich während der Wiedergabe der Beispiele nur in einem begrenzten Bereich bewegen ($\pm 5cm$ in x,y,z-Richtung und $\pm 10^\circ$ Azimut). Diese Kontrolle dient später beim Hauptversuch dazu, dass sich die Ohren aller Probanden während der Wiedergabe möglichst an der selben Position befinden.



Abbildung 8: Simulation von besetztem Zustand mit Bühnenmolton

Folgende Tendenzen waren beim zweiten Vorversuch erkennbar (siehe Abbildung 49 im Anhang):

- Die Beobachtungen aus dem ersten Vorversuch bezüglich Abhängigkeit von der Ordnung und Messposition, sowie der Schwäche des Inphase-Dekoders im Vergleich zu den anderen Dekodern konnte hier auch festgestellt werden.
- Im Vergleich zum ersten Vorversuch sind die Lokalisationsfehler außerhalb des Sweetspot, vor allem bei höheren Ordnungen, deutlich größer. Dies ist vermutlich auf die Laufzeit- bzw. Pegelkompensation zurückzuführen.
- Die Lokalisationsfehler sind bei der nur pegelkompensierten Messung im Sweetspot geringer als bei der pegel- und laufzeitkompensierten Messung. Ebenso sind bei hohen Ordnungen auch die Bewertungen der Lokalisations­schärfe etwas besser.

- Die subjektiven Bewertungen der Lokalisationsschärfe und die Lokalisationsfehler im Fall der pegelkompensierten Messung im Sweetspot sind mit der Messung aus dem ersten Vorversuch für die selbe Position (aber ohne Pegelkompensation) vergleichbar.
- Der neue Dekoder (mixed) verhält sich wie erwartet ähnlich wie der Max r_E und der Basic-Dekoder. Bei höheren Ordnungen liefert er jedoch größere Lokalisationsfehler.
- Die realen Quellen wurden deutlich genauer getroffen als im ersten Vorversuch. Dieses Phänomen beruht auf der verbesserten Genauigkeit des Messsystems durch die Erhöhung der Kameraanzahl (von 8 auf 15) des Trackingsystem.

Dekoder	Ordnung	Winkel
Basic	1	5
Basic	3	5
Basic	5	5
Max r_E	1	5
Max r_E	3	5
Max r_E	5	5
mixed	1	5
mixed	3	5
mixed	5	5
Inphase	1	5
Inphase	3	5
Inphase	5	5
real		3
GESAMT		63

Tabelle 3: Klangbeispiele beim zweiten Vorversuch

3.3.3 finaler Versuchsablauf

Aus den Erkenntnissen der beiden Vorversuche wurden für die Planung des finalen Versuchsablaufs folgende Schlüsse gezogen:

- Die Kompensation der geometriebedingten Laufzeitunterschiede verhält sich unerwartet und verlangt nach einer näheren Untersuchung. Deshalb wird für den finalen Versuch angestrebt, möglichst alle Kombinationen von Dekoder, Ordnung, Winkel und Messpositionen mit sowie ohne Laufzeitkompensation zu messen. Das ergäbe ein Anzahl von mindestens 120 Messungen pro Messposition, was jedoch die Probanden überfordern würde.
- Um genauere Ergebnisse bezüglich des Mixed-Dekoders zu erhalten, ist es notwendig, den Einfluss der Trennfrequenz in zusätzlichen Versuchen zu untersuchen. Dies würde den gesetzten Rahmen für die Versuchsdauer pro Proband sprengen. Deshalb wird ganz auf den Mixed-Dekoder verzichtet.
- Da sich der Inphase-Dekoder bisher als der schlechteste herausgestellt hat, wird mehr Versuchszeit in die Differenzierung zwischen den beiden verbleibenden Dekodern (Basic und Max r_E) investiert. Aus diesem Grund wird der Inphase-Dekoder nur mit Pegel- und Laufzeitkompensation getestet.
- Obwohl man vom Messen der realen Quellen kaum neue Erkenntnisse erwartet, werden sie trotzdem in den Versuch mit einbezogen. Sie dienen als Referenz für die bestmögliche Lokalisationsschärfe. Wegen der geringen Lokalisationsfehler und der daraus resultierenden leichten Identifizierungsmöglichkeit in den Messdaten bilden die Fixpunkte zur Überprüfung der Datenfolge bei der Auswertung.

Daraus ergab sich die in Tabelle 4 dargestellte Zusammenstellung der Klangbeispiele. Diese wurden jedem Probanden an den beiden Messpositionen in unterschiedlicher Reihenfolge vorgespielt.

Dekoder	Ordnung	Kompensation		Winkel
		Pegel	Laufzeit	
Basic	1	ja	nein	5
Basic	1	ja	ja	5
Basic	3	ja	nein	5
Basic	3	ja	ja	5
Basic	5	ja	nein	5
Basic	5	ja	ja	5
Max r_E	1	ja	nein	5
Max r_E	1	ja	ja	5
Max r_E	3	ja	nein	5
Max r_E	3	ja	ja	5
Max r_E	5	ja	nein	5
Max r_E	5	ja	ja	5
Inphase	1	ja	ja	5
Inphase	3	ja	ja	5
Inphase	5	ja	ja	5
real		ja	nein	3
GESAMT				78

Tabelle 4: Klangbeispiele im finalen Versuch

Die Messungen für jeden Proband waren in mehrere Teile gegliedert:

- Zielübung auf optische Ziele zum Kennenlernen des Interfaces
- Einnehmen der ersten Abhörposition (Sweetspot) und Kalibrieren des Headtracking
- Zuspiegelung von mehreren Klangbeispielen zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung
- Einnehmen der zweiten Abhörposition (außerhalb des Sweetspot)
- Zuspiegelung von mehreren Klangbeispielen zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung; die Basis der Wertung soll sich dabei aus den Eindrücken beider Abhörpositionen zusammensetzen
- Einnehmen der ersten Abhörposition (Sweetspot)
- Beginn der Messungen des ersten Teilversuchs

Nach einer kurzen Pause von ca. 10 Minuten wurde die selbe Prozedur (nur ohne Zielübung) für die zweite Messposition wiederholt.

Dieser Ablauf, zusammen mit dem Ablauf der Einzelmessungen, sowie die Anleitung zur Bedienung des Interfaces zum Zeigen und Bewerten, wurde den Probanden im Vorfeld zugeschickt (siehe Abbildung 50 im Anhang).

Die Messungen fanden am 15. und 16. Juli 2008 statt. Es nahmen insgesamt 15 Probanden (2 weibliche, 13 männliche) teil.

4 Auswertung

Zum Vergleich verschiedener Messreihen wird die MatLab-Funktion ANOVA1 verwendet. Sie liefert zwei Teilergebnisse: eine Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance ANOVA) und eine graphische Darstellung von Median und IQR mittels Boxplots. Im Folgenden werden die beiden Berechnungsarten theoretisch und anschließend anhand eines Beispiels erklärt.

Zusätzlich kommen zur graphischen Darstellung von qualitativen Zusammenhängen Bubbleplots, die aus mehreren Histogrammen bestehen, zum Einsatz.

Die Darstellung der abgegebenen Bewertungen erfolgt als Mean Opinion Score (MOS) durch arithmetische Mittelung der Werte.

4.1 MatLab: ANOVA1

4.1.1 Varianzanalyse [5]

Mit der Varianzanalyse oder ANOVA wird untersucht, wie sich die Varianzen zwischen verschiedenen Gruppen von Messwerten im Vergleich zu den Varianzen innerhalb der einzelnen Gruppen verhalten. Dadurch kann festgestellt werden, ob sich die Mittelwerte der Gruppen signifikant voneinander unterscheiden und die gewählte Gruppeneinteilung sinnvoll ist. Voraussetzung für die ANOVA ist eine Normalverteilung der Messwerte. Als Hypothese H_0 wird behauptet, dass keine Unterschiede zwischen den Gruppen festzustellen sind, also alle Messwerte einer einzigen Gruppe zugeordnet werden können. Am Ende der Berechnung erhält man den Wert $F_{observed}$, der eine Aussage liefert, mit welcher Signifikanz diese Hypothese akzeptiert oder abgelehnt wird. Die Berechnung erfolgt in mehreren Schritten:

Schritt 1:

Zuerst werden die quadratischen Abweichungen (Squared Sums) der Mittelwerte \bar{Y}_t der einzelnen Gruppen vom Mittelwert \bar{Y} über alle Gruppen berechnet und mit der Anzahl n_t an Elementen in der jeweiligen Gruppe multipliziert. Die erhaltenen Werte werden über alle Gruppen aufaddiert.

$$SS_G = \sum_{t=1}^k n_t \cdot (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 \quad (14)$$

Schritt 2:

Dann werden innerhalb der einzelnen Gruppen die quadratischen Abweichungen jedes Messwertes $Y_{k,i}$ zum Gruppenmittelwert \bar{Y}_k berechnet und aufsummiert. Wieder werden die Werte für alle Gruppen aufaddiert.

$$SS_{R,k} = \sum_{i=1}^{n_k} (Y_{k,i} - \bar{Y}_k)^2 \quad (15)$$

$$SS_R = \sum_{k=1}^k SS_{R,k} \quad (16)$$

Schritt 3:

Nun werden die beiden Abweichungen SS_G und SS_R durch die Anzahl an Freiheitsgraden dividiert. Die Anzahl an Freiheitsgraden für die Abweichungen zwischen den Gruppen SS_G berechnet sich durch die Gruppenanzahl k als $df_1 = k - 1$. Für N Messwerte insgesamt (in allen Gruppen zusammen) ergibt sich die Anzahl der Freiheitsgrade für die Abweichungen innerhalb der Gruppen zu $df_2 = N - k$.

$$MS_G = \frac{SS_G}{df_1} \quad (17)$$

$$MS_R = \frac{SS_R}{df_2} \quad (18)$$

Schritt 4:

Teilt man MS_G durch MS_R erhält man den Wert $F_{observed}$. In Abhängigkeit von den Freiheitsgraden df_1 und df_2 lässt sich nun ein Wert F_α für ein gewünschtes Signifikanzniveau α aus einer F-Verteilungstabelle ablesen.

Ist der berechnete Werte $F_{observed} \geq F_\alpha(df_1, df_2)$, wird die Hypothese abgelehnt. Ist $F_{observed} < F_\alpha(df_1, df_2)$, so wird sie akzeptiert.

MatLab liefert in der Funktion ANOVA1 direkt das Signifikanzniveau für die Akzeptanz von H_0 und erspart so das Ablesen aus Tabellen.

4.1.2 Boxplot [6]

Ein Boxplot ist eine graphische Darstellungsmöglichkeit für die Verteilung von Messwerten. Dabei wird nicht der Mittelwert, sondern der Medianwert als zentraler Zahlenwert benutzt. Den Median einer Folge der Länge N erhält man, indem man alle Elemente der Größe nach aufsteigend ordnet und das Element in der Mitte auswählt. Bei einer geraden Anzahl N an Zahlen, berechnet sich der Medianwert als arithmetischer Mittelwert der beiden mittleren Zahlen. Wie man in Abschnitt 4.1.3 erkennen kann, ist die Berechnung des Medianwertes sehr tolerant gegenüber Ausreißern. In MatLab ist der Medianwert als waagerechte rote Linie im Boxplot gekennzeichnet.

Ein Maß für die Abweichung der Messwerte vom Medianwert, stellt der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) dar. Diesen Bereich erhält man, wenn man in der aufsteigend geordneten Zahlenfolge $N/4$ vom Medianwert nach unten (unteres Quartil) und oben (oberes Quartil) geht. Zwischen diesen beiden Werten liegen die Hälfte aller Messwerte. Der IQR ist im Boxplot durch waagerechte blaue Linien unterhalb und oberhalb des Medianwertes gekennzeichnet.

Die Einkerbungen (Notches) innerhalb des IQR zeigen denjenigen Bereich an, in dem der wahre Medianwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt. Vergleicht man die Boxplots zweier Gruppen von Messwerten, ist die Überlappung dieser Bereiche von großer Bedeutung: Überlappen sie nicht, so kann mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% behauptet werden, dass auch die wahren Medianwerte der beiden Gruppen nicht gleich sind.

Die schwarzen Ausleger (Whiskers) außerhalb des IQR kennzeichnen einen Bereich, in dem noch weitere Messwerte liegen. Die maximale Größe dieses Bereichs ist standardmäßig auf $1.5 \cdot \text{IQR}$ festgelegt. Werte außerhalb werden als Ausreißer gedeutet und durch rote Kreuze gekennzeichnet.

Der interessante Bereich zum Vergleich mehrerer Messreihen liegt um die Medianwerte. Damit dieser Wertebereich optimal dargestellt werden kann, ist eine Veränderung des Boxplots notwendig: Der Plot wird nur bis zu einer selbst zu wählenden Obergrenze (Cutoff-Wert) dargestellt. Die Anzahl aller Werte außerhalb wird in Prozenten der Gesamtanzahl abgebildet. Diese Form der Darstellung ist vorallem dann von Vorteil, wenn sich Medianwert und Ausreißer um eine Zehnerpotenz unterscheiden. In Abbildung 11 des Beispiels sind die Standardvariante und die veränderte Version dargestellt.

Zum Vergleich der verschiedenen Verfahren wird auch der Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers betrachtet. Da dieser in den meisten Fällen eine einseitige Verteilung ist, darf keine ANOVA angewendet werden. Stattdessen erfolgt der Vergleich durch eine graphische Darstellungsform (Abbildung 9), die wie der Boxplot auf Medianen und Quartilen basiert.

Innerhalb des grüne Bereichs liegen die kleinsten Fehler. Dieser Bereich deckt 25% aller Messwerte ab. Die Grenze zum gelben Bereich stellt daher das unterste Quartil dar. Im gelben Bereich liegen die Werte zwischen dem untersten Quartil und dem Median. Der rote Bereich kennzeichnet alle Werte oberhalb des Median und unterhalb des obersten Quartils. Der IQR erstreckt sich also vom unteren Ende des gelben Bereichs bis zum oberen Ende des roten. Die Prozentzahlen geben die Ausreißer (weiter als $1.5 \cdot \text{IQR}$ vom obersten Quartil entfernt) an. Diese Darstellung ist an übliche Darstellungsformen von

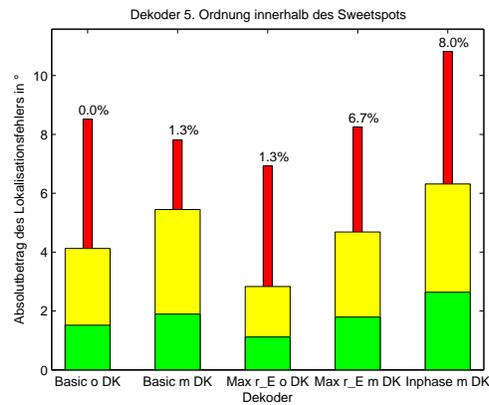


Abbildung 9: Beispiel für die Darstellung des Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers

Mittelwert und Standardabweichung angepasst und lässt vergleichbare Aussagen zu. Sie hat jedoch den Vorteil einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern.

4.1.3 Beispiel

Zur Verdeutlichung der beiden obengenannten Berechnungsarten, wird hier ein kleines Beispiel durchgeführt.

Vergleich: Unfallrisiko Sommer/Winter

Es wurde für 12 Jahre jeweils die Anzahl an schweren Verkehrsunfällen für eine Gemeinde im Juli (stellvertretend für den Sommer) und Dezember (stellvertretend für den Winter) desselben Jahres festgehalten. Folgende Werte ergaben sich:

Sommer: $x_S = [3 \ 4 \ 2 \ 3 \ 1 \ 3 \ 4 \ 2 \ 5 \ 3 \ 10 \ 2]$

Winter: $x_W = [6 \ 8 \ 5 \ 7 \ 0 \ 6 \ 4 \ 6 \ 8 \ 5 \ 7 \ 6]$

Die Hypothese H_0 lautet, dass die Anzahl an Verkehrsunfällen unabhängig von der Jahreszeit ist.

Varianzanalyse

$$SS_G = \sum_{t=1}^k n_t \cdot (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 = 12 \cdot (3.5 - 4.5833)^2 + 12 \cdot (5.6667 - 4.5833)^2 = 28.1675$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^k SS_{R,k} = \sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^{n_k} (Y_{k,i} - \bar{Y}_k)^2 = 59 + 50.6667 = 109.6667$$

$$MS_G = \frac{SS_G}{k-1} = \frac{SS_G}{2-1} = 28.1675$$

$$MS_R = \frac{SS_R}{N-k} = \frac{SS_R}{24-2} = 4.9849$$

$$F_{observed} = \frac{MS_G}{MS_R} = 5.6506$$

Für ein α von 5% (Verteilungstabellen gibt es meistens nur für Signifikanzniveaus von 10%, 5%, 2.5% und 1%) liegt $F_{0.05}(1, 22)$ bei 4.30. Da $F_{observed} = 5.6506 \geq 4.30$, wird die Hypothese mit einem Signifikanzniveau von $1 - \alpha = 95\%$ abgelehnt. Die Berechnung von MatLab zeigt die gleichen Zwischenergebnisse und liefert sogar ein α von 2.66% (siehe Abbildung 10). Dieses Ergebnis bedeutet, dass die Anzahl der Verkehrsunfälle mit einem Signifikanzniveau von 97.34% von der Jahreszeit abhängen.

ANOVA Table					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	28.167	1	28.1667	5.65	0.0266
Error	109.667	22	4.9848		
Total	137.833	23			

Abbildung 10: Ergebnisse der Varianzanalyse mit MatLab

Boxplot

Zur Bestimmung des Medianwertes und des IQR werden die Messwerte innerhalb der zwei Gruppen der Größe nach aufsteigend geordnet. Es ergeben sich folgende Werte:

Sommer: $x_S = [1\ 2\ 2\ 2\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 4\ 4\ 5\ 10] \Rightarrow$ Median: 3, IQR: $4 - 2 = 2$

Der Wert 10 ist außerhalb der Whiskers (1.5·IQR oberhalb des oberen Quartils oder unterhalb des unteren Quartils $\rightarrow -1 \leq x \leq 7$) und wird als Ausreißer interpretiert.

Winter: $x_W = [0\ 4\ 5\ 5\ 6\ 6\ 6\ 6\ 7\ 7\ 8\ 8] \Rightarrow$ Median: 6, IQR: $7 - 5 = 2$

Hier ist der Wert 0 außerhalb der Whiskers ($\rightarrow 2 \leq x \leq 10$) und wird auch als Ausreißer interpretiert.

Da sich die Quartilsbereiche um die beiden Medianwerte für Sommer und Winter schon nicht überlappen, muss dies auch für die eingekerbten Bereiche (Notches) gelten. Deshalb kann man mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95% sagen, dass wahren Medianwerte nicht gleich sind, d.h. es gibt einen signifikanten Unterschied zwischen der Anzahl an schweren Verkehrsunfällen im Sommer und im Winter.

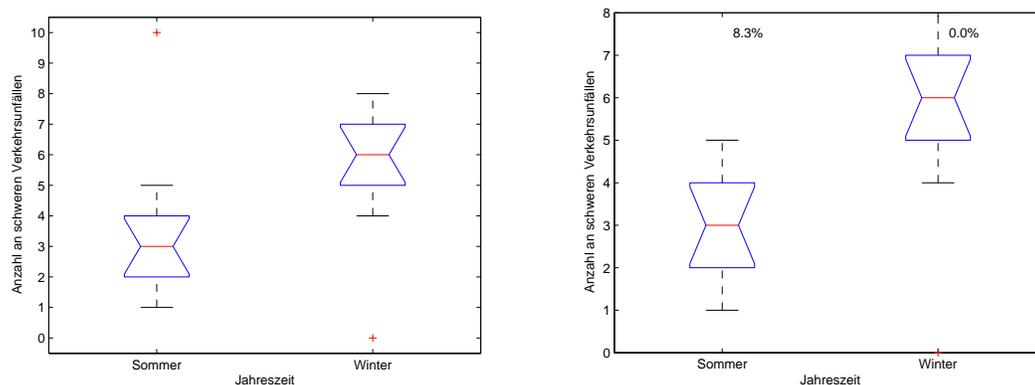


Abbildung 11: Ergebnisse des Standard-Boxplots und der abgeänderten Version mit Cutoff bei 8

Obwohl Varianzanalyse und Boxplots verschiedene Berechnungen durchführen, kommt man mit beiden Methoden zu dem Ergebnis, dass Unfallrisiken jahreszeitabhängig sind.

4.2 Bubbleplot

Die *Bubbleplots* werden eingesetzt, um die Gleichmäßigkeit der Winkelabbildung zu untersuchen, d.h. ob gleichmäßig links und rechts daneben gezielt wird. Als Grundlage dienen Histogramme zu jedem wiedergegebenen Winkel [7]. Die Breite des zusammengefassten Winkelbereichs innerhalb eines Kreises (Bubble) ist einstellbar. Der Radius eines Kreises ist proportional zur Anzahl der Messwerte innerhalb des jeweiligen Bereichs. Zur leichten Orientierung ist eine Ideallinie (grün) und eine Linie (rot), die sich aus den verbundenen Medianwerten für die einzelnen Winkel zusammensetzt, eingezeichnet. Sind diese beiden deckungsgleich, so wird gleichmäßig auf beiden Seiten daneben gezielt.

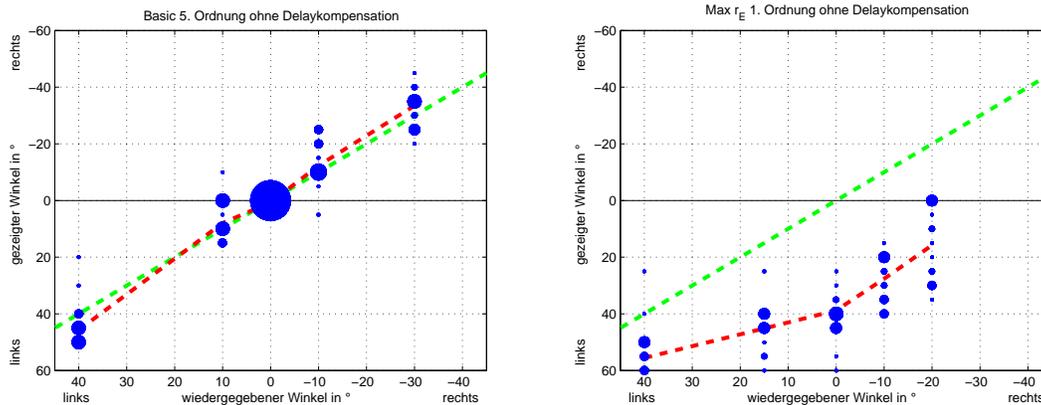


Abbildung 12: *links*: gleichmäßige Winkelabbildung; *rechts*: alle Winkel werden zu weit links angezeigt

4.3 Mean Opinion Score [5]

Die Bewertung der Lokalisationschärfe geschieht auf einer fünfstufigen Skala. Zusätzlich zur Überprüfung mittels einer Varianzanalyse, erfolgt die Darstellung als Einzahlwert durch Mittelung der Bewertungen (MOS= **M**ean **O**pinion **S**core) über die Probanden. Der MOS wird meistens zum Vergleich der Qualität bei Sprachübertragungen benutzt. Obwohl jeder Proband eine eigene Vorstellung von Qualität hat, kann der MOS zum Vergleich verschiedener Verfahren innerhalb eines Versuchs herangezogen werden, weil davon ausgegangen wird, dass diese Vorstellung des Probanden während seiner gesamten Versuchsreihe konstant bleibt.

5 Ergebnisse

5.1 Zuverlässigkeit der Probanden

Da jede Messkombination aus Hörposition, Dekoder, Ordnung, Winkel und Delaykompensation bei jedem Probanden nur einmal gemessen wurde, ist zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Probanden keine Bewertung der Abweichungen bei Wiederholungen möglich. Stattdessen wird die Abweichung von Median, IQR und Ausreißern zwischen den Probanden verglichen. Die rote Linie in den folgenden Plots zeigt den Median über alle Probanden. Die grüne zeigt die 0° Achse, um systematische Offsets des Gesamtmedians zu überprüfen.

5.1.1 innerhalb des Sweetspots

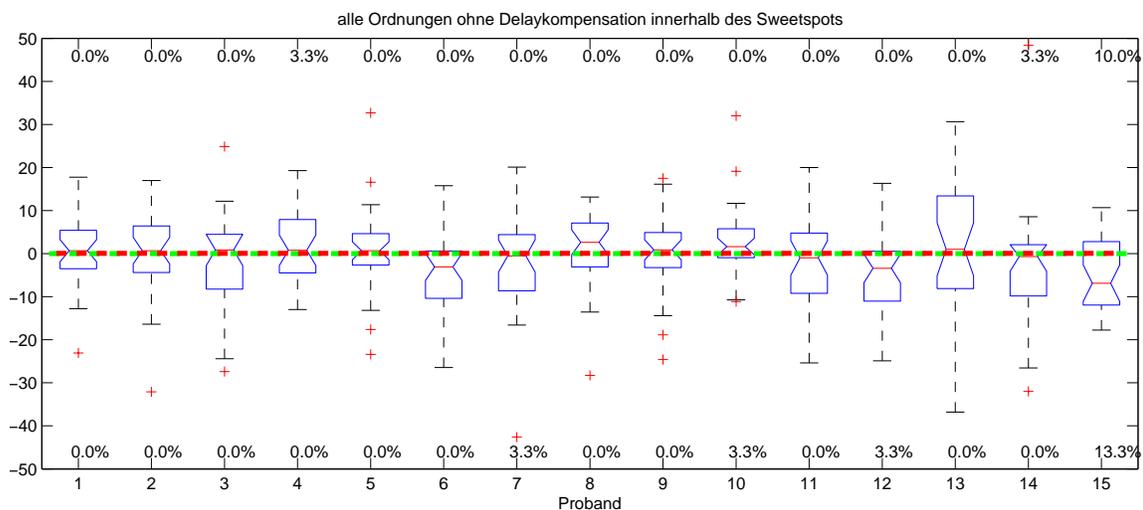


Abbildung 13: Winkelfehler je Proband für alle Ordnungen ohne Delaykompensation im Sweetspot

Die Mediane für die Verfahren ohne Delaykompensation liegen alle nahe am gemeinsamen Median und der 0° Achse. Es wird also im Mittel gleichmäßig links und rechts daneben gezielt. Man erkennt, dass fast die Hälfte der Probanden (3, 7, 10, 12, 14 und vorallem 15) zu großen Ausreißern neigen. Diese liegen im Winkelbereich so weit außen, dass sie wahrscheinlich durch eine Vorne/Hinten-Verwechslung entstanden sind.

Werden die Messwerte mit Delaykompensation auch einbezogen, so erhöht sich die Anzahl der Ausreißer sehr stark. Nur ein Drittel der Probanden (1, 5, 8, 9, 13) zeigt keine Ausreißer. Durch die Phasenprobleme bei der Delaykompensation steigt die Anzahl der Ausreißer bei den Probanden 4 und 15 sehr stark. Die Mediane sind insgesamt noch dicht an der grünen Ideallinie.

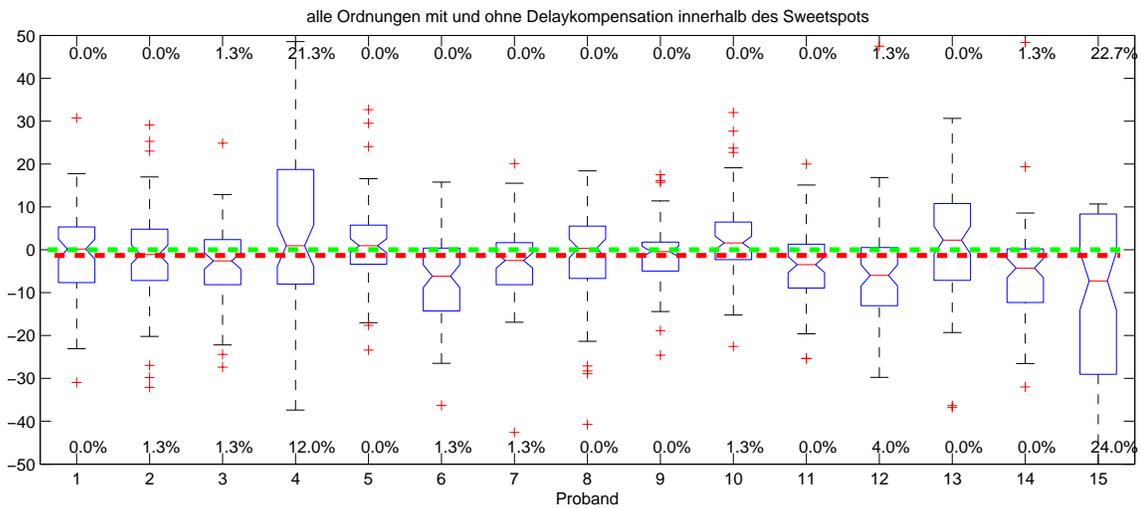


Abbildung 14: Winkelfehler je Proband für alle Ordnungen mit/ohne Delaykompensation im Sweetspot

5.1.2 außerhalb des Sweetspots

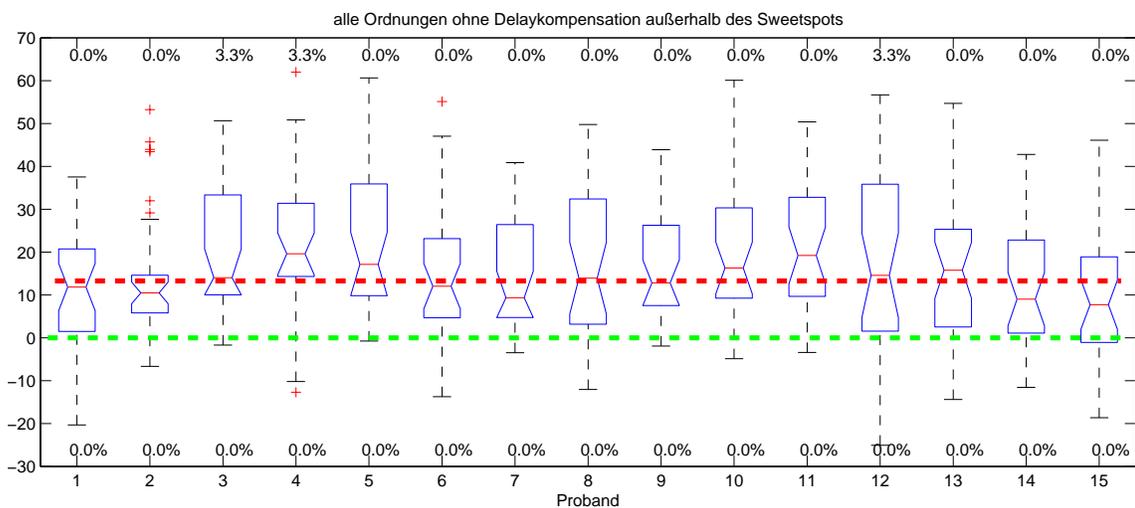


Abbildung 15: Winkelfehler je Proband für alle Ordnungen ohne Delaykompensation außerhalb des Sweetspots

Außerhalb des Sweetspots weicht der Gesamtmedian ohne Delaykompensation stark von der 0° Achse ab. Insgesamt gibt es viel weniger Ausreißer (3, 4, 12) als bei den gleichen Messungen im Sweetspot.

Betrachtet man alle Messungen außerhalb des Sweetspots, also mit und ohne Delaykompensation, so steigt wieder die Anzahl der Ausreißer. Im Vergleich zu den Messungen im Sweetspot sind es aber viel weniger. Dafür hat sich der Offset vom vorherigen Plot nochmals vergrößert. Die Unterschiede zwischen den Probanden sind außerhalb des Sweetspots viel geringer als innerhalb.

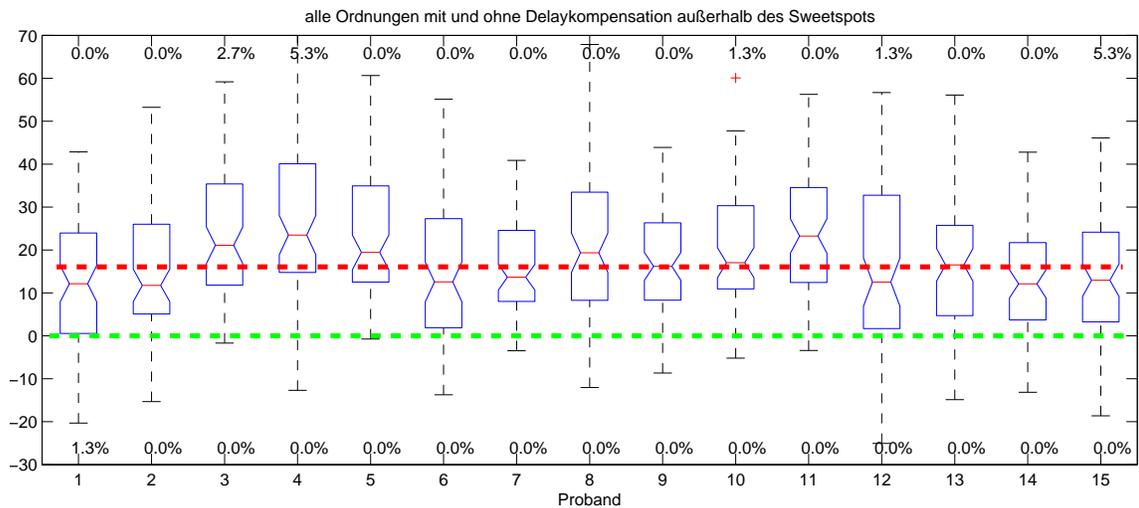


Abbildung 16: Winkelfehler je Proband für alle Ordnungen mit/ohne Delaykompensation außerhalb des Sweetspots

Insgesamt zeigt sich eine Zunahme des Offsets und der Ausreißer beim Einsatz der Delaykompensation für beide Hörpositionen. Es ist jedoch kein Zusammenhang zwischen der Richtung dieses Offsets und der dominanten Seite der Probanden festgestellt werden. Im Sweetspot sind die Unterschiede zwischen den Probanden größer als außerhalb. Einige der Probanden scheinen empfindlicher gegenüber Phasenproblemen zu sein und neigen zur Vorne/Hinten-Verwechslung. Da die beobachteten Phänomene aber keine Einzelfälle sind und auf generelle Tendenzen hinweisen, werden die Messwerte der entsprechenden Probanden auch zur Auswertung herangezogen.

Somit basieren die folgenden Ergebnisse auf den Messwerten aller Probanden.

5.2 reale Quellen

In Abbildung 17 sind der Bubbleplot und die Bewertung für die realen Quellen bei Abhörposition im Sweetspot dargestellt. Man erkennt die sehr gute Abbildung zwischen wiedergegebenem und gezeigtem Winkel, sowie die Bewertung, die im Mittel nur sehr wenig unter der höchstmöglichen Punktzahl liegt. Für den Lautsprecher in 0° Richtung ist die Bewertung sehr wenig besser als für die anderen. Eine Varianzanalyse zeigt aber nur eine Signifikanz von 32.5% für die Unterscheidbarkeit der Lautsprecher bezüglich ihrer Bewertung.

Die Ergebnisse sind nicht unerwartet, da die realen Quellen leicht als solche zu identifizieren sind und aufgrund der Sichtbarkeit der Lautsprecher gut anvisiert werden können.

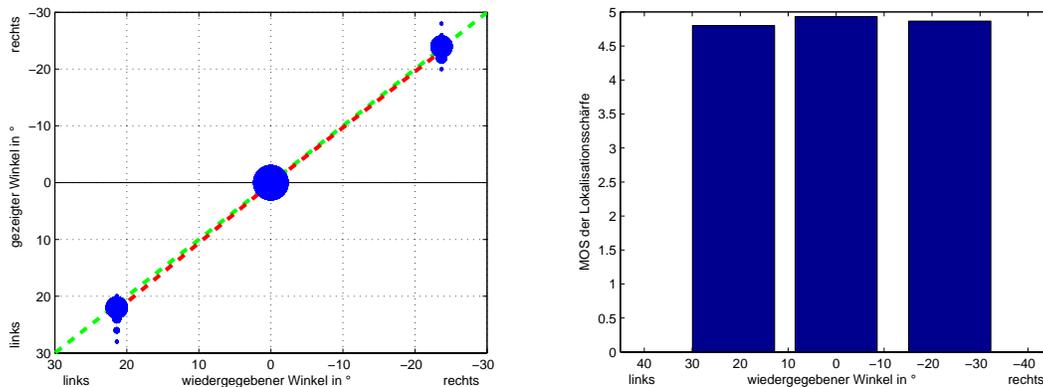


Abbildung 17: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 1^\circ$) und Bewertung realer Quellen im Sweetspot

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für die realen Quellen bei Abhörposition außerhalb des Sweetspots. Es sind kaum Unterschiede zur Messung im Sweetspot feststellbar. Die Bewertung ist allerdings sehr wenig besser. Das liegt vermutlich daran, dass die Unterschiede zu den anderen Klangbeispielen (keine realen Quellen) außerhalb des Sweetspots größer sind als innerhalb.

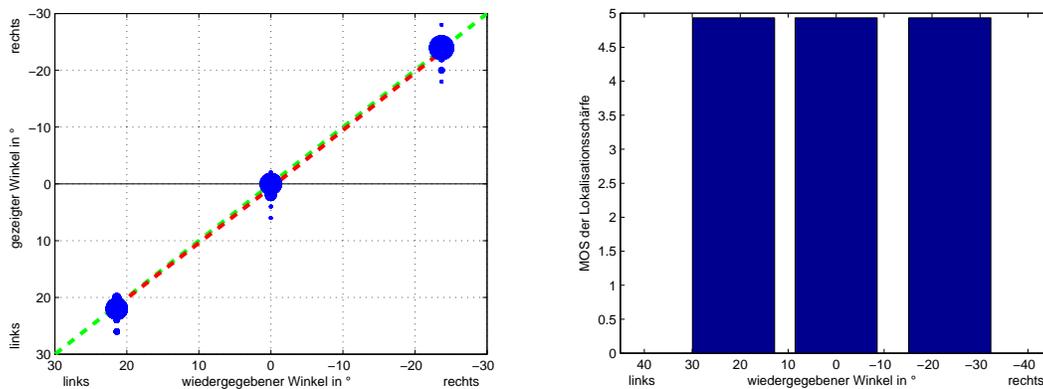


Abbildung 18: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 1^\circ$) und Bewertung realer Quellen außerhalb des Sweetspots

Die Ergebnisse für die realen Quellen liefern keine neuen Erkenntnisse, aber sie zeigen, dass das Messsystem für beide Messpositionen richtig funktioniert.

5.3 Einfluss der Dekoder-Ordnung

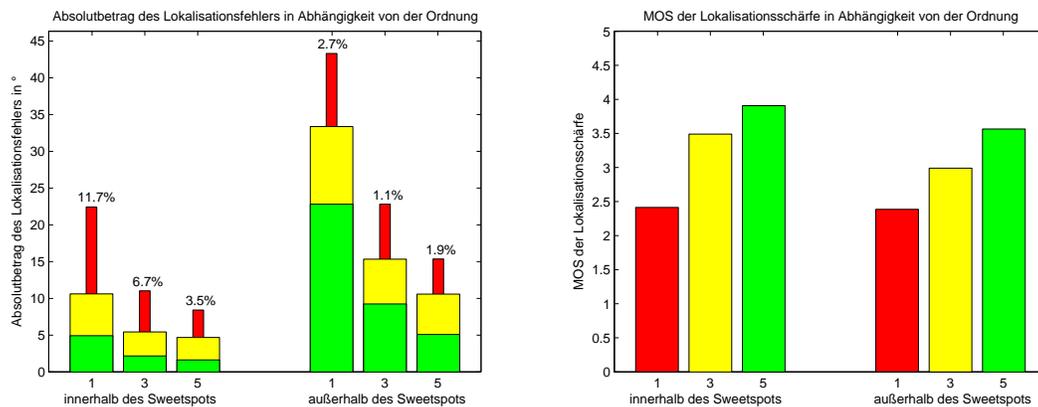


Abbildung 19: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für verschiedene Ordnungen

In Abbildung 19 sind der Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und der MOS für verschiedene Ordnungen dargestellt. Der Lokalisationsfehler wird mit zunehmender Ordnung geringer. Umgekehrt wird die Bewertung zu hohen Ordnungen hin besser. Dieses Verhalten gilt für beide Hörpositionen. Die Fehler sind allerdings außerhalb des Sweetspots wesentlich größer als innerhalb. Für die Bewertung ist die Abhängigkeit von der Hörposition geringer. Die Varianzanalyse zeigt für die Unterscheidbarkeit der Ordnungen bezüglich ihrer Bewertung eine Signifikanz von fast immer 100%.

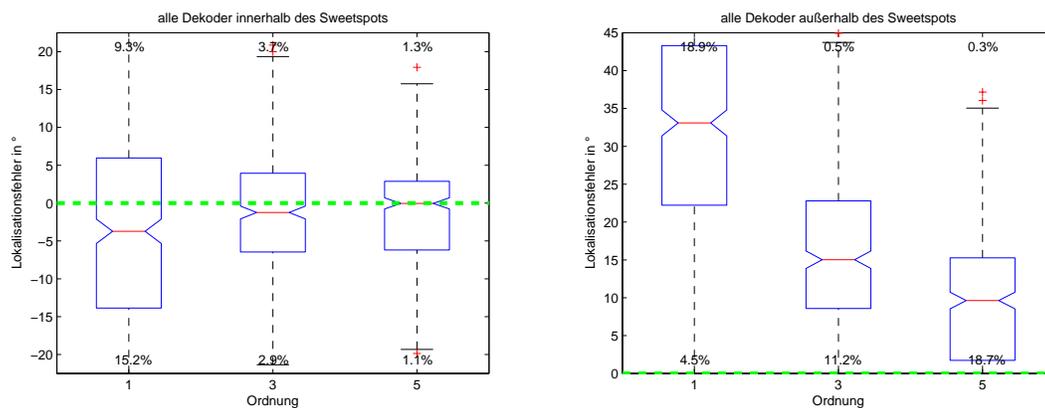


Abbildung 20: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für verschiedene Ordnungen

In Abbildung 20 ist der Lokalisationsfehler vorzeichenbehaftet dargestellt. Während der Fehler im Sweetspot relativ gleichmäßig um die 0° Achse (grüne Linie) verteilt ist, sind außerhalb des Sweetspots mehr als 75% der Werte (alles oberhalb des untersten Quartils) auf der positiven Seite. Das bedeutet, dass außerhalb des Sweetspots alle Winkel tendenziell zu weit links wahrgenommen werden. Während mit zunehmender Ordnung im Sweetspot lediglich der IQR und die Anzahl der Fehllokalisierungen kleiner werden, wird außerhalb des Sweetspots der Offset der Mediane zur 0° Achse geringer. Dieses Phänomen ist so stark, dass die Ordnungen außerhalb des Sweetspots anhand des vorzeichenbehafteten Lokalisationsfehlers mit einem Signifikanzniveau von 100% unterschieden werden können.

5.4 Einfluss der Delaykompensation

Für die Untersuchung des Einflusses der Delaykompensation wurden nur Max r_E - und Basic-Dekoder herangezogen (siehe Abschnitt 3.3.3).

5.4.1 innerhalb des Sweetspots

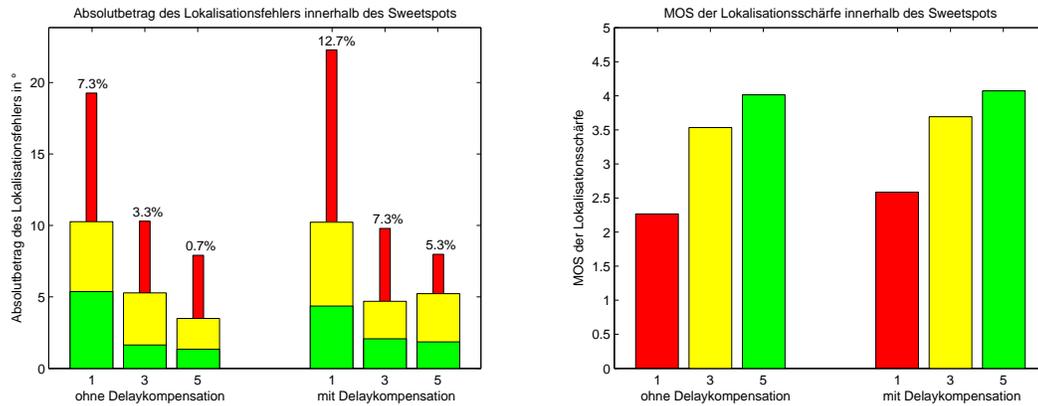


Abbildung 21: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS mit und ohne Delaykompensation im Sweetspot

In Abbildung 21 erkennt man, dass innerhalb des Sweetspots der Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und die Anzahl der Ausreißer mit Delaykompensation größer ist als ohne. Besonders groß ist der Unterschied bei den Dekodern fünfter Ordnung. Die Bewertung zeigt keine großen Unterschiede. Nur bei der ersten Ordnung sind die Werte mit Delaykompensation signifikant (99.01%) besser. Von den Probanden wurde oft ein phasiger Klang bei aktivierter Delaykompensation wahrgenommen. Anscheinend wurde die Vorgabe, nicht nach der Klangfarbe zu urteilen, im Übermaß ernst genommen. Das erklärt auch den etwas höheren MOS bei eingeschalteter Delaykompensation.

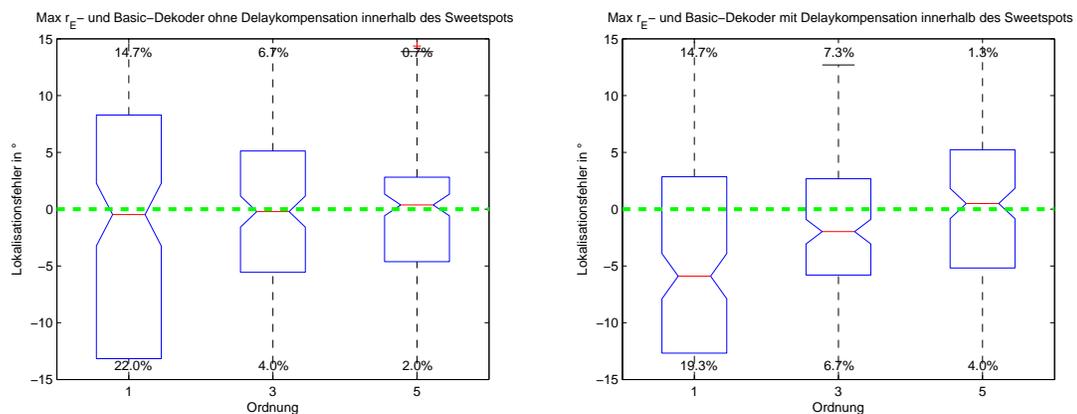


Abbildung 22: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für verschiedene Ordnungen im Sweetspot

Abbildung 22 zeigt einen Offset nach rechts (negative Winkel) für die Messungen mit Delaykompensation. Diese Tendenz nimmt mit steigender Ordnung ab. Im Vergleich der Werte für die Dekoder fünfter Ordnung, erkennt man einen größeren IQR und mehr Ausreißer bei Verwendung der Delaykompensation.

5.4.2 außerhalb des Sweetspots

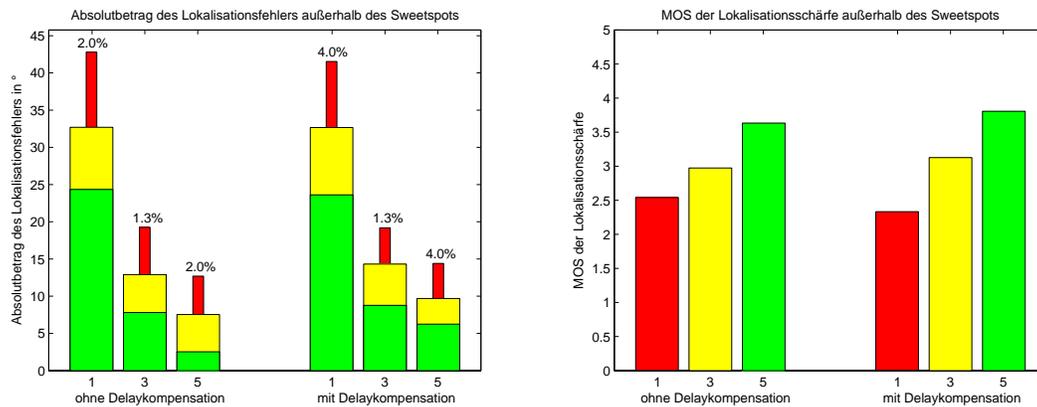


Abbildung 23: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS mit und ohne Delaykompensation außerhalb des Sweetspots

Außerhalb des Sweetspots ist der Einfluss einer Delaykompensation bezüglich des Absolutbetrages ausschließlich bei der höchsten Ordnung deutlich erkennbar. Die Unterschiede zwischen den Bewertungen sind nicht signifikant.

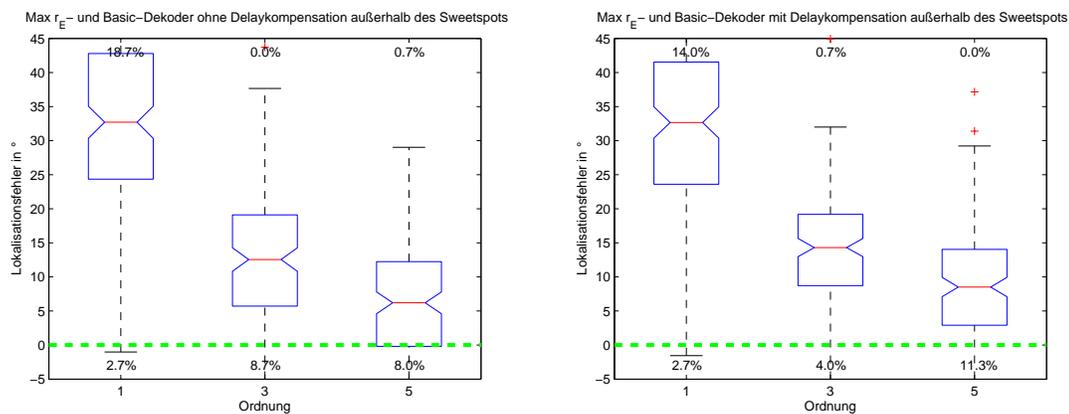


Abbildung 24: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehlers für verschiedene Ordnungen außerhalb des Sweetspots

Bei der Betrachtung des vorzeichenbehafteten Lokalisationsfehlers zeigen sich in der Größe der IQRs kaum Unterschiede zwischen den Messungen mit und ohne Delaykompensation. Deutlich ist aber der geringere Offset bei der höchsten Ordnung ohne Delaykompensation. Die in Abschnitt 5.3 beobachtete Tendenz der Abnahme des Offsets mit zunehmender Ordnung ist hier wieder zu finden.

Ein möglicher Grund für die höheren Lokalisationsfehler mit Delaykompensation ist in der Diskrepanz zwischen dem akustischen und optischen Raumeindruck zu finden. Durch die Kompensation werden einige Lautsprecher akustisch nach hinten gesetzt, sind aber weiterhin an ihrer Position sichtbar. Dadurch kann es zu Verwirrungen der Probanden kommen.

5.5 Unterscheidbarkeit der Richtung

Bisher wurden die Dekoder nur unabhängig von der gezeigten Richtung untersucht. In diesem Abschnitt wird auf die Unterschiede der einzelnen Richtungen eingegangen.

5.5.1 innerhalb des Sweetspots

1. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Max r_E -Dekoders

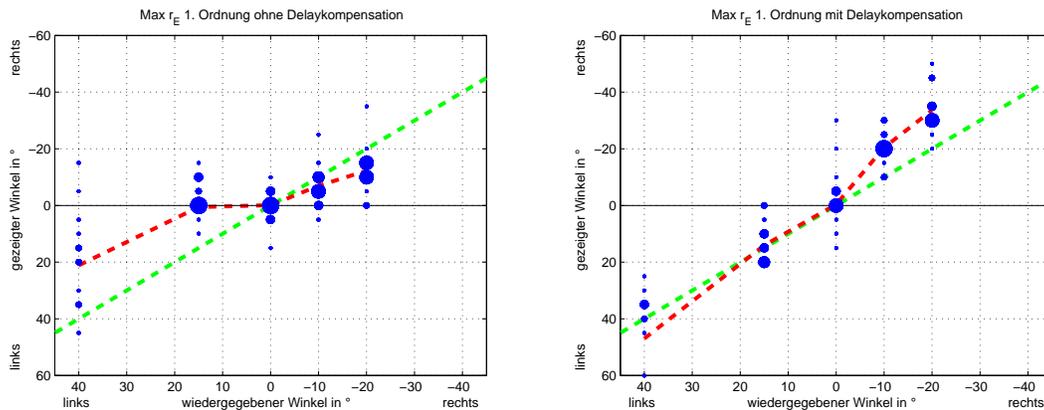


Abbildung 25: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 1. Ordnung im Sweetspot

In Abbildung 25 erkennt man, dass ohne Delaykompensation alle Winkel tendenziell zu klein angezeigt werden. Das lässt sich damit erklären, dass ohne Kompensation der Schall des Lautsprechers 1 (0° Richtung) die geringste Laufzeit zum Hörer hat. Da bei erster Ordnung der Anteil dieses Lautsprechers wegen der breiten Hauptkeule auch für seitliche Richtungen relativ groß ist, wird die wahrgenommene Richtung gemäß des Gesetzes der ersten Wellenfront tendenziell zur 0° Richtung hin verschoben. Im Fall der Delaykompensation gibt es keine Laufzeitunterschiede, dafür aber die Diskrepanz zwischen der akustischen und optischen Position der Lautsprecher. Diese könnte auch zu einer Verschiebung der Winkel, aber in diesem Fall nach außen hin, führen. Beide Tendenzen sind auch in Abbildung 26 zu sehen.

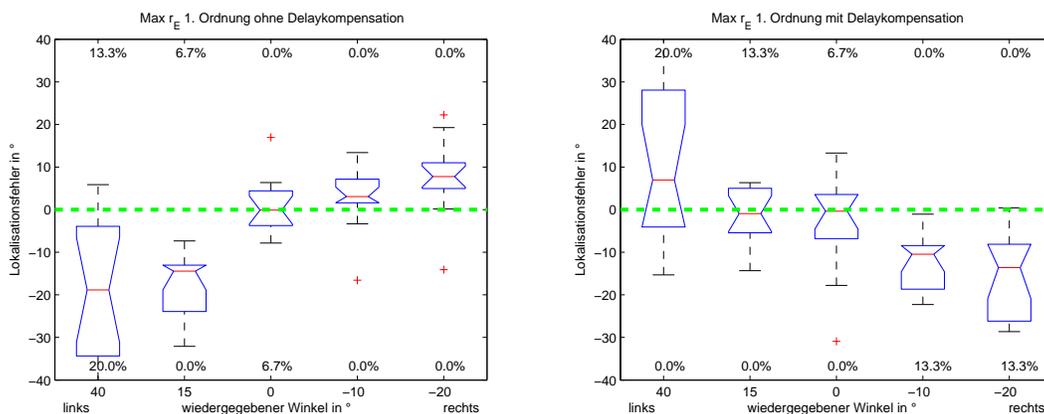


Abbildung 26: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 1. Ordnung im Sweetspot

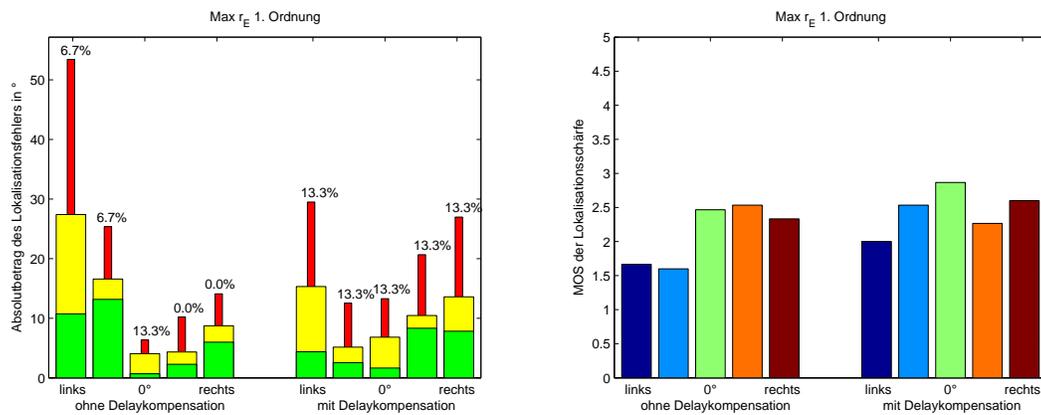


Abbildung 27: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 1. Ordnung im Sweetspot

Die Werte für den Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers (Abbildung 27) zeigen deutlich die Abnahme der Fehler zur Mitte hin. Die Fehler mit und ohne Delaykompensation sind ähnlich, bei Verwendung der Kompensation gibt es aber mehr Ausreißer durch die zunehmende Vorne/Hinten-Verwechslung. Die Bewertungen werden zur Mitte hin besser und sind mit Delaykompensation generell etwas höher.

3. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Basic-Dekoders

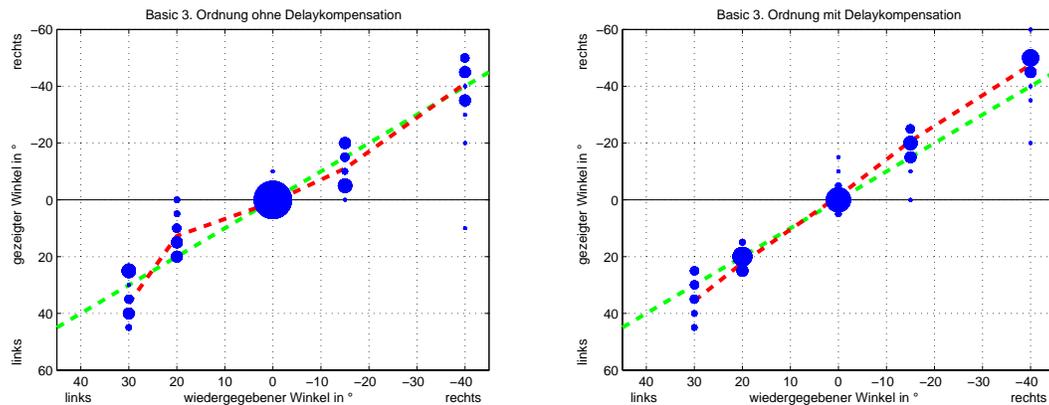


Abbildung 28: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 3. Ordnung im Sweetspot

In den Abbildungen 28 und 29 ist die breitere Abbildung der Winkel mit Delaykompensation noch gut zu erkennen. Die umgekehrte Tendenz ohne Delaykompensation verschwindet hier. Die Zunahme der Genauigkeit bei der 0° Richtung ist jetzt noch deutlicher zu erkennen, vor allem ohne Delaykompensation.

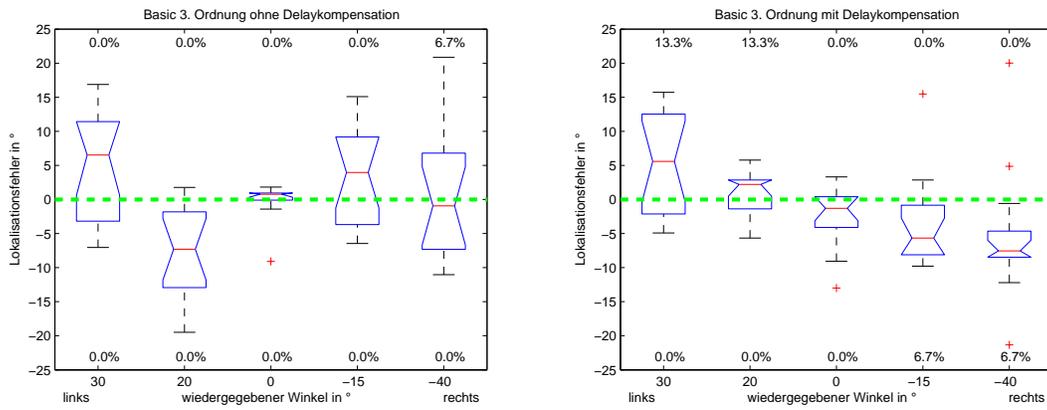


Abbildung 29: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 3. Ordnung im Sweetspot

Der Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und die Bewertung der Lokalisationsschärfe verhalten sich wie schon bei den Dekodern erster Ordnung: Man erkennt eine deutlich bessere Genauigkeit und Bewertung für die 0° Richtung. Insgesamt sind natürlich die Fehler kleiner und die Bewertungen besser als bei niedrigerer Ordnung.

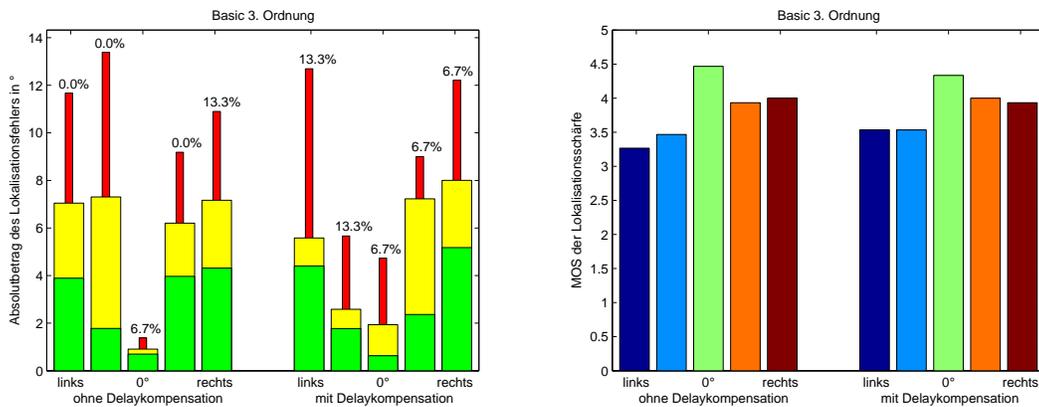


Abbildung 30: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 3. Ordnung im Sweetspot

5. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Basic-Dekoders

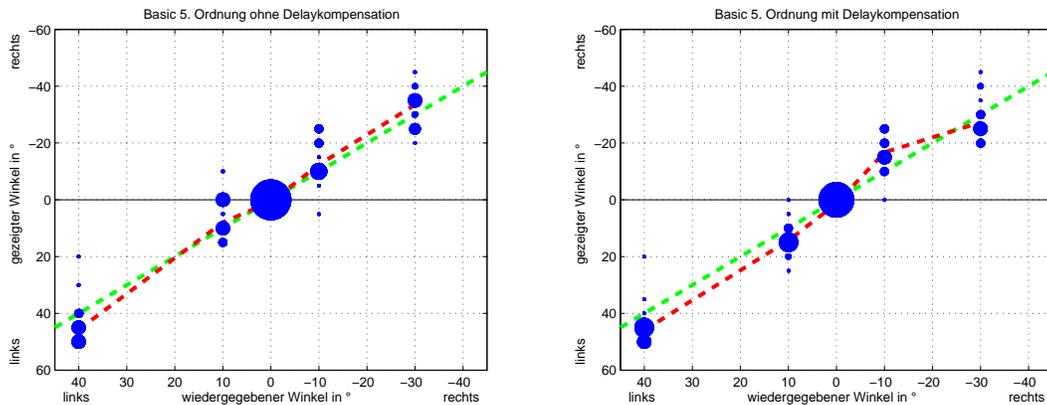


Abbildung 31: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 5. Ordnung im Sweetspot

Im Vergleich zu den niedrigeren Ordnung erkennt man, dass sich die rote Linie immer besser an die grüne Linie annähert. Ohne Delaykompensation ist nun eine sehr leichte Überschätzung der Winkel zu erkennen. Dieses Phänomen ist aber bei den anderen Dekoder der selben Ordnung nicht zu erkennen.

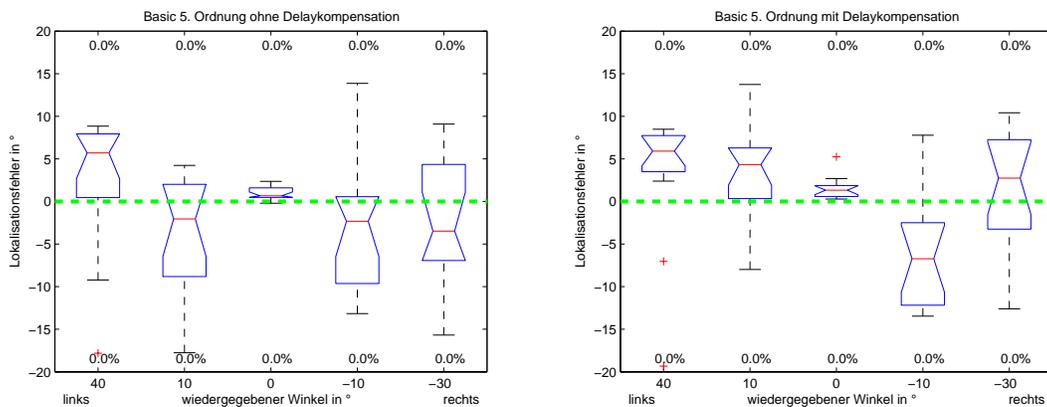


Abbildung 32: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 5. Ordnung im Sweetspot

Bei den Absolutbeträgen und Bewertungen (Abbildung 33) hält die zuvor beobachtete Tendenz an. Die Fehlermediane sind ohne Delaykompensation deutlich geringer als mit, obwohl die Vorne/Hinten-Verwechslung bei dieser Ordnung vollkommen verschwunden ist.

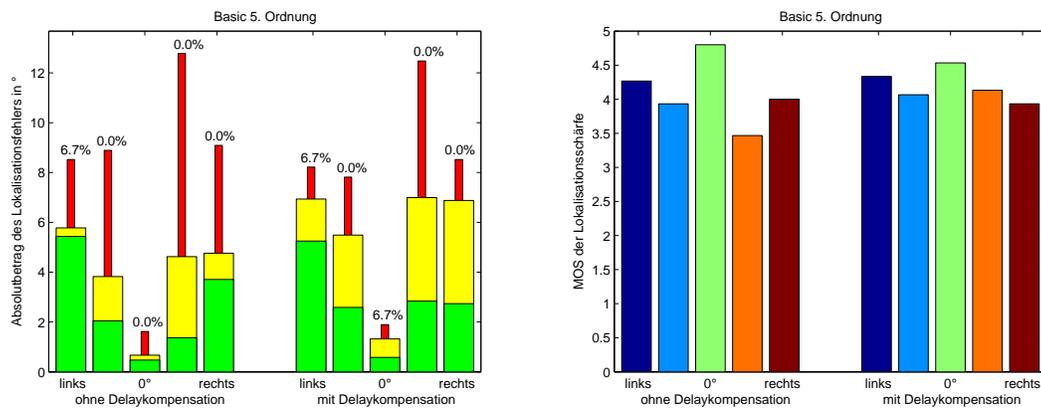


Abbildung 33: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 5. Ordnung im Sweetspot

In Tabelle 5 sind die Signifikanzniveaus für die Unterscheidbarkeit der Winkel bezüglich der vorzeichenbehafteten Lokalisationsfehler und der Bewertung der Lokalisationsschärfe für die Hörposition im Sweetspot für alle Dekoder dargestellt.

Dekoder	Ordnung	Delaykomp.	Signifikanzniveau		kleinster Fehlermedian	beste Bewertung
			Winkelfehler	Bewertung		
Basic	1	nein	99.79%	10.43%	0°	-15°
		ja	99.72%	59.34%	0°	10°
	3	nein	99.86%	99.41%	0°	0°
		ja	97.28%	81.66%	0°	0°
	5	nein	98.16%	99.72%	0°	0°
ja	> 99.99%	48.66%	0°	0°		
Max r_E	1	nein	69.72%	96.84%	0°	-10°
		ja	99.97%	85.04%	0°	0°
	3	nein	93.59%	99.87%	0°	0°
		ja	93.21%	32.05%	0°	-25°
	5	nein	99.96%	99.24%	0°	0°
ja	99.68%	87.64%	0°	0°		
Inphase	1	ja	99.69%	75.43%	30°	15°
	3	ja	98.02%	56.14%	0°	20°
	5	ja	94.70%	3.06%	0°	20°

Tabelle 5: Signifikanzniveaus für die Unterscheidbarkeit der Winkel im Sweetspot bezüglich Winkelfehler und Bewertung

Man kann deutlich erkennen, dass der kleinste Fehler fast immer in der 0° Richtung auftritt. Gleichzeitig ist auch die Bewertung meistens für diese Richtung am besten. Ausnahmen dazu finden sich hauptsächlich bei den Inphase-Dekodern aller betrachteten Ordnungen. Dass diese Dekoder im Vergleich zu den Basic- und Max r_E -Dekodern insgesamt deutlich schlechtere Ergebnisse liefern, wird für den Fall der fünften Ordnung in Abschnitt 5.6 gezeigt.

Die deutliche Bevorzugung der 0° Richtung kann folgendermaßen erklärt werden: In diese Richtung kann der Mensch am besten lokalisieren (dadurch auch die bessere Bewertung). Die Richtung wird identifiziert und dann kann optisch gezielt werden, weil es in der 0° Richtung ein Lautsprecher steht. Die anderen Richtungen können generell schon schlechter lokalisiert werden und es gibt keine optischen Orientierungsmöglichkeiten. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass bei diesen Hörversuchen keine Häufung der angezeigten Winkel an den Lautsprecherpositionen (außer in 0° Richtung) festzustellen ist.

5.5.2 außerhalb des Sweetspots

1. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Max r_E -Dekoders

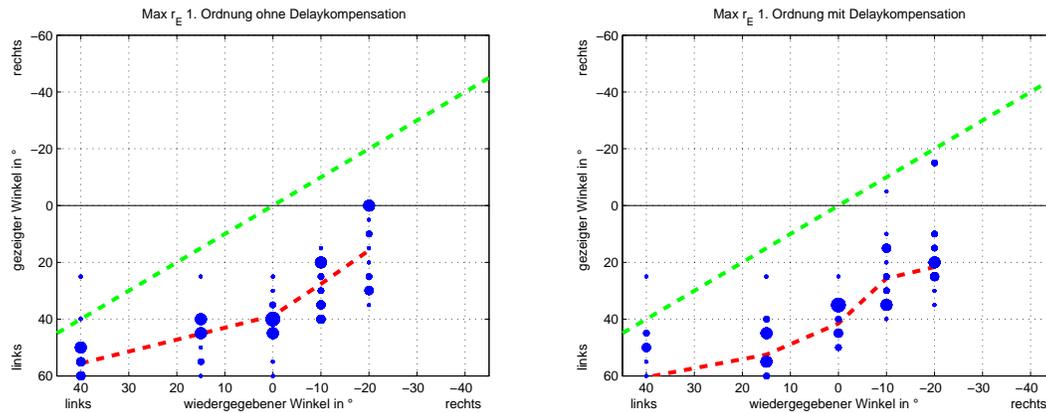


Abbildung 34: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 1. Ordnung außerhalb des Sweetspots

In den Abbildungen 34 und 35 erkennt für beide Fälle die Verschiebung aller Winkel zur linken Seite. Dieser Offset der Mediane wird von links zur Mitte hin größer und bleibt dann eher konstant. Das liegt an der Hörposition, die sich links vom Sweetspot befindet (Abbildung 6). Durch die Nähe zu den linken Lautsprechern ist ihr Pegel größer und auch die Laufzeit geringer. Dadurch wird die Abbildung der virtuellen Quelle stark nach links verschoben.

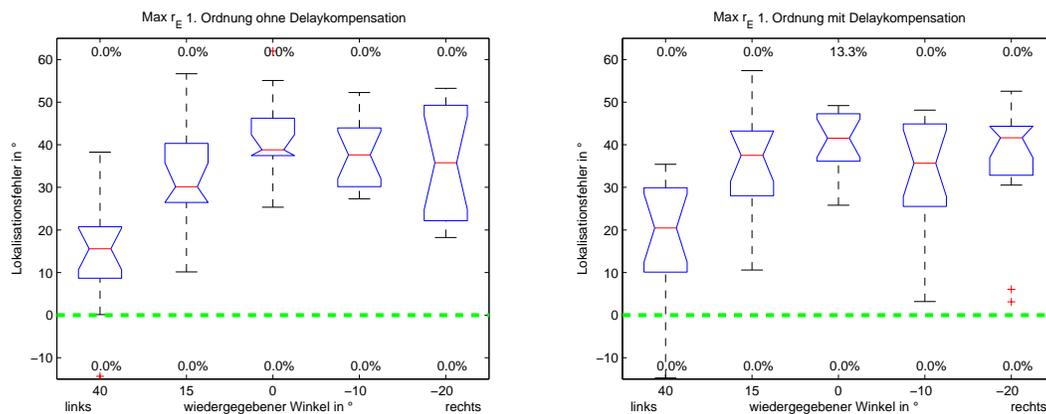


Abbildung 35: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 1. Ordnung außerhalb des Sweetspots

In der Darstellung des Absolutbetrages (Abbildung 36) erkennt man diese Tendenz deutlich. Durch den nach rechts hin abfallenden Pegel sinkt auch die Bewertung der Lokalisationsschärfe in diese Richtung.

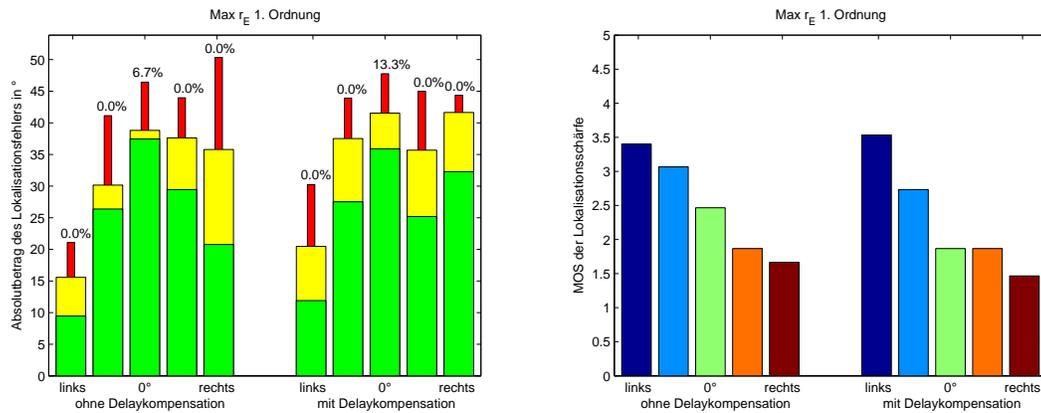


Abbildung 36: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 1. Ordnung außerhalb des Sweetspots

3. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Basic-Dekoders

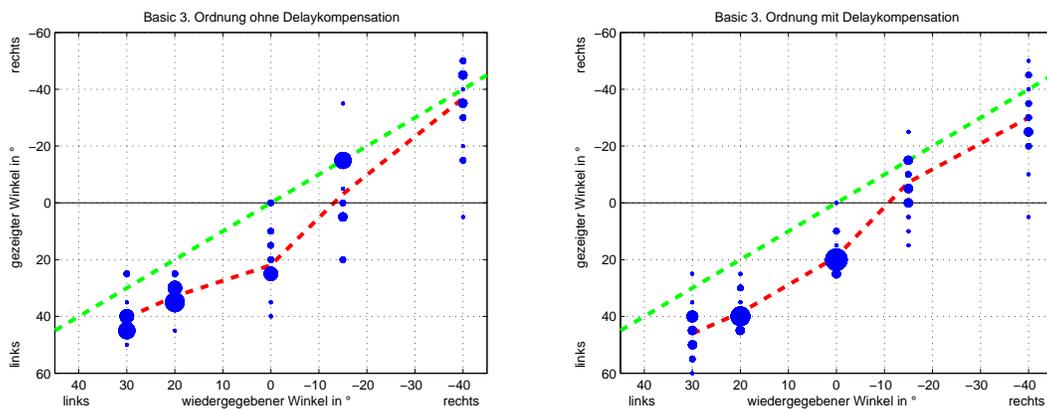


Abbildung 37: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 3. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Durch die höhere Ordnung wird die Hauptkeule schmaler. Dies bewirkt, dass die linken Lautsprecher bei Winkeln auf der rechten Seite geringe Pegel haben als bei niedrigerer Ordnung. Dadurch wird die Links-Verschiebung auf der rechten Seite geringer (Abbildungen 37 und 38). Der Offset zur 0° Richtung wird nun von links zur Mitte hin größer und dann wieder kleiner.

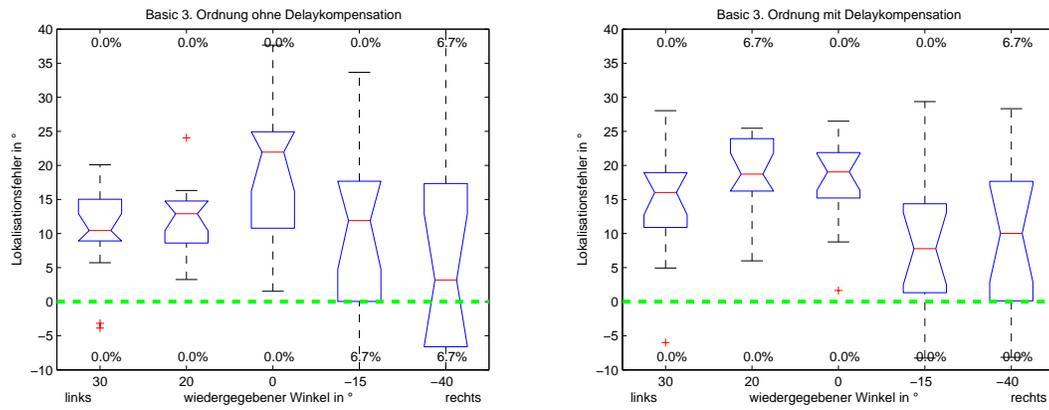


Abbildung 38: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 3. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Auch in Abbildung 39 erkennt man die Häufung der Lokalisationsfehler in der Mitte. Umgekehrt nimmt die Bewertung der Lokalisationsschärfe im Vergleich zur ersten Ordnung rechts außen wieder zu.

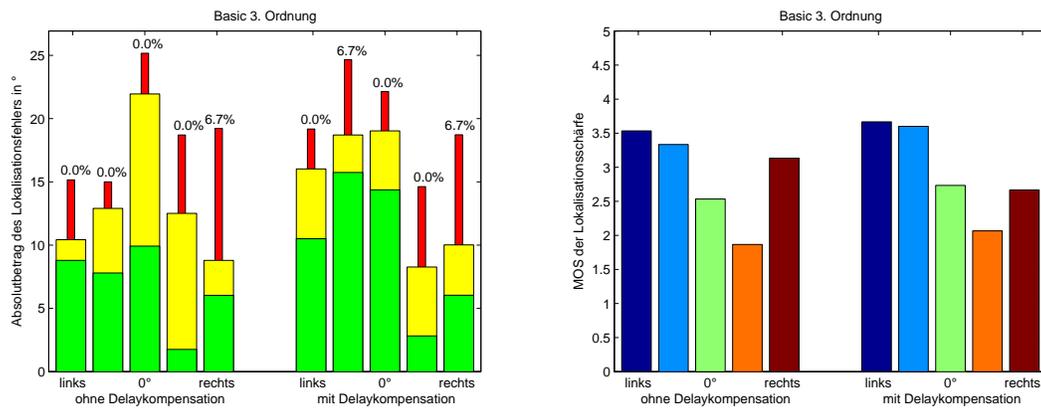


Abbildung 39: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 3. Ordnung außerhalb des Sweetspots

5. Ordnung stellvertretend am Beispiel eines Basic-Dekoders

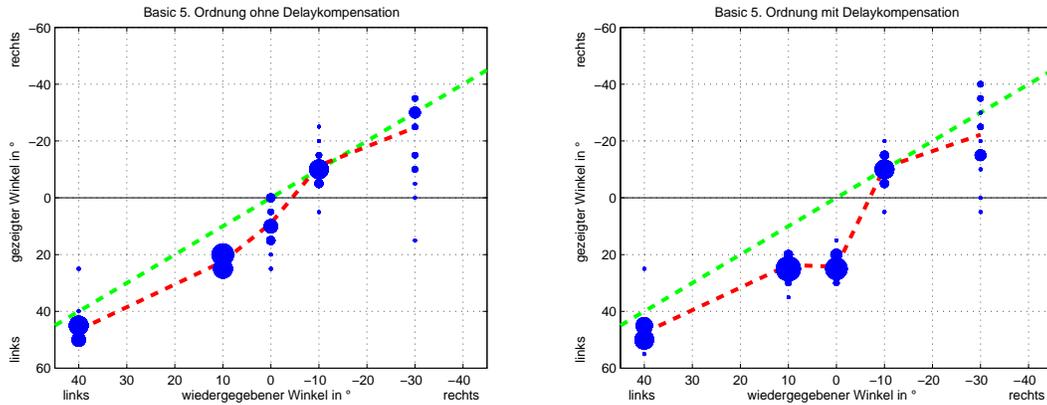


Abbildung 40: Winkelabbildung (Auflösung $\pm 2.5^\circ$) für 5. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Bei der fünften Ordnung wird die Entwicklung der dritten Ordnung fortgesetzt: Der Offset wird insgesamt kleiner und ist nun im Bereich um ca. 0° bis 10° am größten. Weiter links und weiter rechts ist er deutlich geringer. Bei Verwendung der Delaykompensation wird der Fehler vor allem in der 0° Richtung größer.

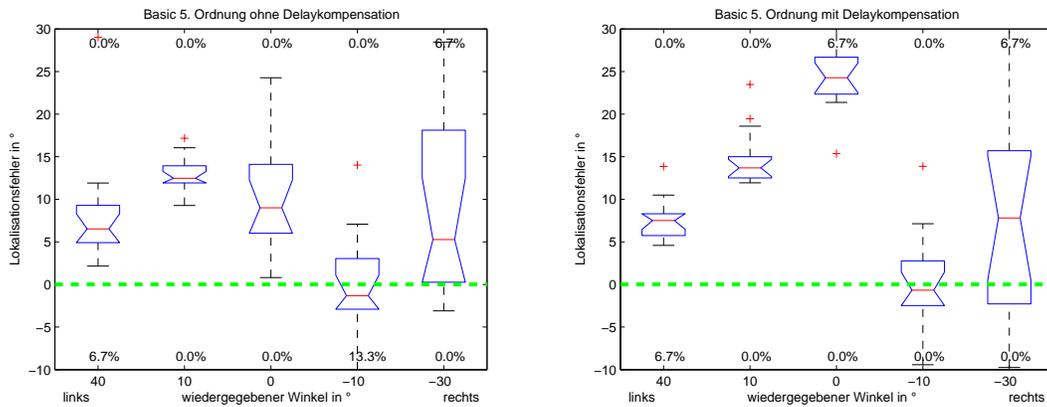


Abbildung 41: vorzeichenbehafteter Lokalisationsfehler für 5. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Die Tendenzen aus dem vorzeichenbehafteten Lokalisationsfehler und dem Bubbleplot sind auch im Absolutbetrag des Fehler (Abbildung 42) deutlich zu erkennen. Die Bewertung wird allerdings nach rechts hin wieder schlechter. Bei Verwendung eines Max r_E -Dekoders ist die Bewertung weitaus homogener.

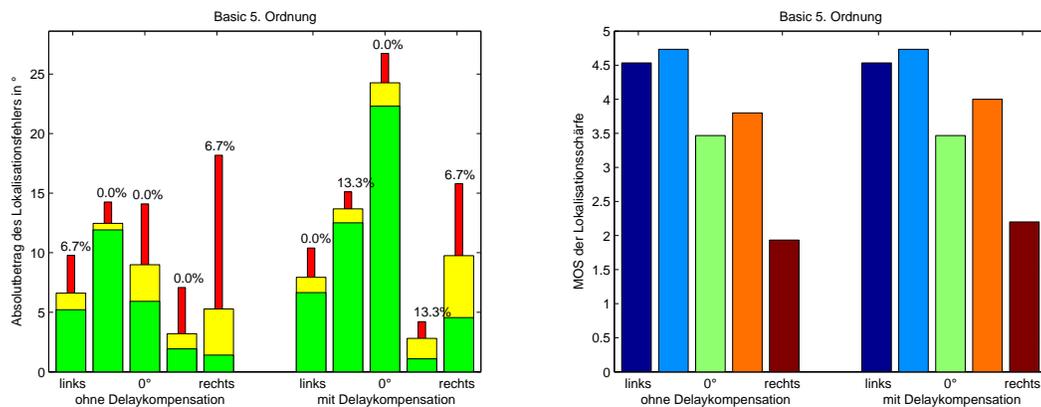


Abbildung 42: Absolutbetrag des Lokalisationsfehlers und MOS für 5. Ordnung außerhalb des Sweetspots

In Tabelle 6 erkennt man, dass der größte Fehler meistens in oder links neben der 0° Richtung auftritt. Der kleinste Fehler passiert bei niedrigen Ordnungen auf der linken Seite. Bei höheren Ordnungen liegt er auf der rechten Seite, weil der Einfluss der linken Lautsprecher wegen der schmäleren Hauptkeule geringer wird. Die besten Bewertungen erhalten die linken Richtungen. Mit zunehmender Ordnung wandert die bevorzugte Richtung näher zur Mitte hin (außer bei den Inphase-Dekodern). Die schlechtesten Bewertungen werden für die Richtungen auf der rechten Seite abgegeben. Die $\text{Max } r_E$ -Dekoder fünfter Ordnung (vor allem ohne Delaykompensation) zeigen jedoch eine gleichmäßigere Bewertung.

Dekoder	Ordn.	Delayk.	Signifikanzniveau		Fehlermedian		Bewertung	
			Winkelfl.	Bewertg.	kleinst	größt	best	schlecht
Basic	1	nein	99.85%	> 99.99%	40°	-30°	40°	-30°
		ja	89.88%	> 99.99%	40°	0°	40°	-30°
	3	nein	94.87%	99.97%	-40°	0°	30°	-15°
		ja	97.95%	> 99.99%	-15°	0°	30°	-15°
	5	nein	99.94%	> 99.99%	-10°	10°	10°	-30°
ja	> 99.99%	> 99.99%	-10°	0°	10°	-30°		
$\text{Max } r_E$	1	nein	> 99.99%	> 99.99%	40°	0°	40°	-20°
		ja	99.99%	> 99.99%	40°	0°	40°	-20°
	3	nein	> 99.99%	49.51%	-25°	0°	35°	-25°
		ja	99.12%	80.29%	-25°	15°	35°	-25°
	5	nein	> 99.99%	99.96%	30°	10°	10°	0°
ja	> 99.99%	51.83%	-25°	0°	10°	0°		
Inphase	1	ja	57.00%	> 99.99%	-40°	0°	30°	-20°
	3	ja	94.31%	> 99.99%	-30°	0°	35°	-30°
	5	ja	81.74%	99.42%	-20°	20°	20°	-10°

Tabelle 6: Signifikanzniveaus für die Unterscheidbarkeit der Winkel außerhalb des Sweetspots bezüglich Winkelfehler und Bewertung

5.6 Vergleich der Dekoder 5. Ordnung

Aufgrund der besten Bewertungen und kleinsten Lokalisationsfehler, werden in diesem Abschnitt nur Dekoder fünfter Ordnung verglichen, um den besten für die jeweilige Hörposition zu finden.

5.6.1 innerhalb des Sweetspots

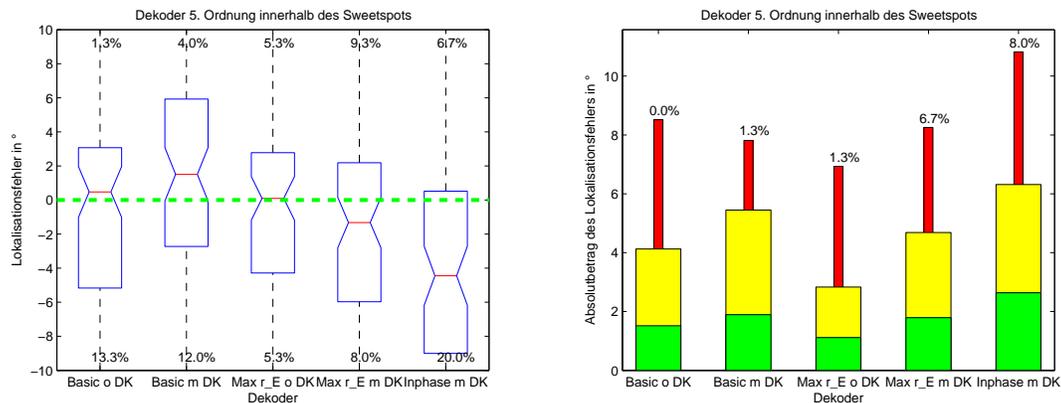


Abbildung 43: Lokalisationsfehler für 5. Ordnung innerhalb des Sweetspots

In Abbildung 43 erkennt man, dass der Max r_E -Dekoder die kleinsten Fehler liefert. Er wird dicht gefolgt vom Basic-Dekoder. Man erkennt auch die Erhöhung der Fehler durch die Delaykompensation. Der Inphase-Dekoder schneidet am schlechtesten ab. Für alle fünf Verfahren zusammen ergibt sich ein Signifikanzniveau von 92,77% für die Gleichheit. Betrachtet man nur die zwei besten Verfahren, also Basic und Max r_E ohne Delaykompensation, so ergeben sich 64,18% für die Unterscheidbarkeit. Bezüglich des Lokalisationsfehlers unterscheiden sich die beiden Dekoder im Sweetspot also kaum.

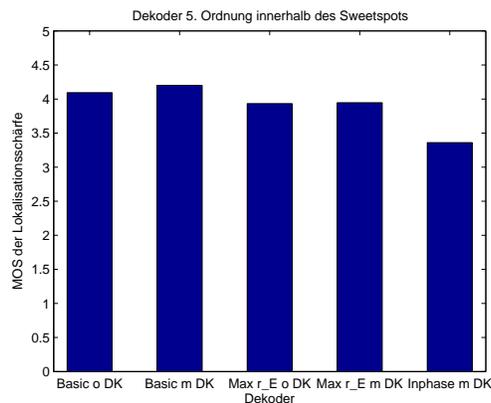


Abbildung 44: MOS für 5. Ordnung innerhalb des Sweetspots

Im MOS unterscheiden sich Basic- und Max r_E -Dekoder auch kaum. Der Inphase-Dekoder erhält auch hier die schlechtesten Werte. Man erkennt die leichte Erhöhung des MOS beim Einsatz der Delaykompensation. Die Unterscheidbarkeit aller fünf Kombinationen ergibt bezüglich der Bewertung ein Signifikanzniveau von > 99,99%. Betrachtet man wieder nur Basic und Max r_E ohne Delaykompensation, so ergeben sich nur 71,19% für die Unterscheidbarkeit.

5.6.2 außerhalb des Sweetspots

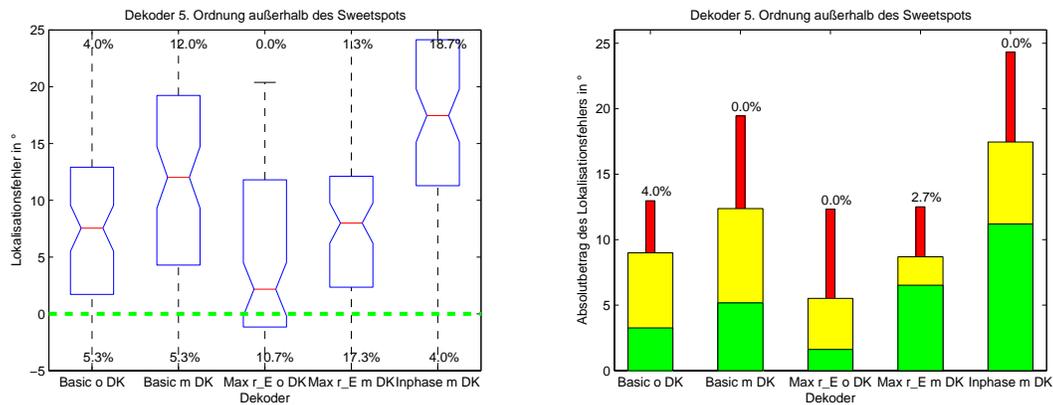


Abbildung 45: Lokalisationsfehler für 5. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Die Unterscheidbarkeit aller Verfahren fünfter Ordnung bezüglich der Lokalisationsfehler außerhalb des Sweetspots ist $> 99.99\%$. Die Unterschiede sind für diese Hörposition viel deutlicher. Betrachtet man wieder nur die zwei besten Verfahren, Basic und Max r_E ohne Delaykompensation, so ergibt sich für deren Unterscheidbarkeit noch 99.50% . Die Lokalisationsfehler des Max r_E -Dekoders sind damit signifikant kleiner als beim Basic-Dekoder. Mit deutlichem Abstand treten die größten Lokalisationsfehler beim Inphase-Dekoder auf.

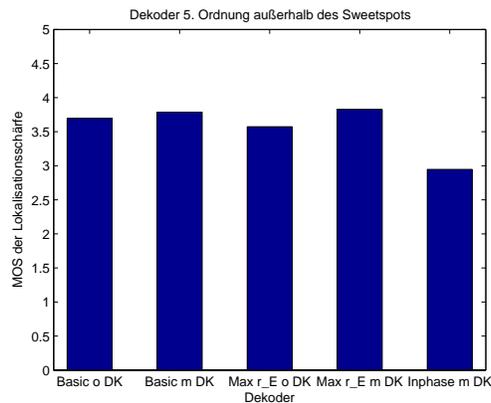


Abbildung 46: MOS für 5. Ordnung außerhalb des Sweetspots

Mit der Bewertung verhält es sich wie im Sweetspot: Für alle Verfahren zusammen liegt die Unterscheidbarkeit bei $> 99.99\%$. Für die Unterscheidung von Basic und Max r_E ergeben sich nur 50.31% , d.h. man kann nicht sagen, ob sie eher gleich oder eher unterschiedliche Bewertungen liefern.

Man sollte also aufgrund der Erhöhung des Lokalisationsfehlers für die gegebenen Abhörbedingungen keine Delaykompensation verwenden. Innerhalb des Sweetspots bestehen zwischen Max r_E - und Basic-Dekodern kaum Unterschiede. Außerhalb des Sweetspots aber liefert der Max r_E -Dekoder signifikant kleinere Lokalisationsfehler und erhält keine signifikant schlechteren Bewertungen.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Hörversuche kann für den Cube eine Empfehlung für den Max r_E -Dekoder ausgesprochen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

- Wie angenommen, sinkt bei zunehmender Ordnung der Lokalisationsfehler und die Bewertung der Lokalisationsschärfe steigt. Diese Tendenz ist unabhängig von Hörposition und Delaykompensation. Innerhalb des Sweetspots sind die Lokalisationsfehler geringer und die Bewertungen besser als außerhalb.
- Entgegen der Annahme bringt die Delaykompensation keine signifikante Verbesserung der Lokalisationsschärfe. Dafür steigt aber der Lokalisationsfehler. Dies könnte aus der Diskrepanz zwischen den akustischen und optischen Position der Lautsprecher resultieren. Andererseits erklärt das nicht die Zunahme der Vorne/Hinten-Verwechslung. Einige Probanden zeigen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Phasenproblemen. Bei Daniel [1] werden Phasenprobleme ("spectral unbalance") auf überbestimmte Lautsprecheranordnungen ($L > 2M + 2$) zurückgeführt. Für die gegebene Wiedergabesituation erweist sich eine Delaykompensation als ungünstig.
- Innerhalb des Sweetspots zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen wiedergegebener Richtung und den Lokalisationsfehlern. Diese werden, wie zu erwarten, nach außen hin größer, was mit der zur Seite hin abnehmenden Lokalisationsfähigkeit des Menschen zusammenhängt. Der Lokalisationsfehler in der 0° Richtung erreicht sehr kleine Werte und es ist eine deutliche Überbewertung dieser Richtung zu verzeichnen. Dafür können zwei weitere Gründe angegeben werden: zum Einen die erhöhte Lautsprecherdichte in dieser Richtung und zum Anderen die Sichtbarkeit der Lautsprecher.
- Außerhalb des Sweetspots ist eine Verschiebung der wahrgenommenen Richtung nach links (Hörposition links vom Sweetspot) erkennbar. Gleichzeitig nimmt die Bewertung von links nach rechts stark ab. Das liegt daran, dass die Reproduktion von Schallereignissen stark in die Richtung der nahen Lautsprecher verzerrt wird. Bei zunehmender Ordnung wird die Hauptkeule schmaler. Dadurch wird der Einfluss der nahen Lautsprecher für Winkel auf der rechten Seite geringer und der Lokalisationsfehler sinkt. Auch die Bewertung wird auf der rechten Seite wird mit zunehmender Ordnung besser. Bei der höchsten Ordnung konzentriert sich der Fehler auf einen schmalen Bereich links von der 0° Richtung. Diese Richtungsabhängigkeit außerhalb des Sweetspots hängt vermutlich nicht mit der Sichtbarkeit der Lautsprecher zusammen.
- Der Max r_E -Dekoder hat sich für die gegebene Wiedergabeordnung als das beste Verfahren erwiesen. Die Bewertungen der Lokalisationsschärfe sind wegen der breiteren Hauptkeule zwar etwas schlechter als beim Basic-Dekoder, aber nicht signifikant. Außerhalb des Sweetspots ist der Lokalisationsfehler des Max r_E dagegen signifikant kleiner. Dieses Ergebnis entspricht also den Erwartungen.
Über die schlechten Ergebnisse des Inphase-Dekoders lässt sich nur spekulieren. Dieses Verfahren zeigt eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Phasenproblemen und liefert daher mit Delaykompensation schlechte Werte. Leider konnte eine Untersuchung des Dekoders ohne Delaykompensation aus Kapazitätsgründen (begrenzte Probandenanzahl und Versuchsdauer) nicht durchgeführt werden. In den Vorversuchen hat der Inphase-Dekoder auch ohne Delaykompensation schlecht abgeschnitten.
- Insgesamt hat sich Ambisonics als tolerant gegenüber unregelmäßiger Lautsprecheraufstellung und realen Abhörbedingungen (kein schalltoter Raum) erwiesen, wodurch dem Verfahren eine gewisse "Wohnzimmertauglichkeit" zuzusprechen ist.

Weitere Untersuchungen sollten mit verhüllten Lautsprechern stattfinden, um optische Einflüsse zu vermeiden. Da das Messsystem eine (fast) beliebig große Anzahl an gleichzeitigen Probanden zulässt, wäre eine Vermessung von mehreren Positionen zur gleichen Zeit denkbar, wenngleich Interaktion zwischen den Probanden unerwünscht bleibt. Dadurch wäre eine effiziente Kartierung der Lokalisationseigenschaften für mehrere Raumpunkte gleichzeitig möglich.

Literatur

- [1] J. Daniel, "Représentation de Champs Acoustiques, Application à la Transmission et à la Reproduction de Scènes Sonores Complexes dans un Contexte Multimédia", Ph.D. Thesis, University of Paris 6, Paris, France, 2000
- [2] J. Blauert, "Spatial Hearing", The MIT Press, MA, 1983
- [3] T. Huber, "Zur Lokalisation akustischer Objekte bei Wellenfeldsynthese", Diplomarbeit, Institut für Rundfunktechnik, München, 2002
- [4] M. Perkmann, "Entwurf und Durchführung eines Hörversuches zur Ortung und Lokalisation von Phantomschallquellen bei Elevation", Projektarbeit, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz, 2005
- [5] A. Sontacchi, "Versuchsdesign in der Psychoakustik", Vorlesungsunterlagen, Institut für Elektronische Musik und Akustik, Graz, 2007
- [6] The MathWorks, Inc., "Help on boxplot", 1994-2005
- [7] C. Guastavino et al, "SPATIAL AUDIO QUALITY EVALUATION: COMPARING TRANSAURAL, AMBISONICS AND STEREO", in Proceedings of the 13th International Conference on Auditory Display, Montréal, Canada, June 26-29, 2007

Anhang

Real				außerhalb			innerhalb		
Fullrange				Azimuth	MOS	delta	Azimuth	MOS	delta
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
1 real		12	23,7	22,7	5	1,0	23,7	5	0,0
1 real		12	-21,4	-28,2	5	6,8	-28,7	5	7,3
1 real		12	23,7	19,7	5	4,0	22,8	5	0,9
				5	3,9		5,0	2,8	
				0	2,9		0	3,98	
Tiefpass				außerhalb			innerhalb		
Fullrange				Azimuth	MOS	delta	Azimuth	MOS	delta
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
2 real		12	23,7	22,6	4	1,1	22,1	3	1,6
2 real		12	23,7	21,3	4	2,4	24,9	5	1,2
2 real		12	-21,4	-23,6	4	2,2	-26,2	4	4,8
				4	1,9		4,0	2,5	
				0	0,68		1	1,97	
Hochpass				außerhalb			innerhalb		
Fullrange				Azimuth	MOS	delta	Azimuth	MOS	delta
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
3 real		12	23,7	20,6	5	3,1	22,2	5	1,5
3 real		12	-21,4	-30,4	4	9,0			
3 real		12	23,7	20,6	5	3,1	22,4	5	1,3
				4,67	5,1		5,0	1,4	
				0,6	3,4		0	0,16	
Tiefpass				außerhalb			innerhalb		
1. Ordnung				Azimuth	MOS	delta	Azimuth	MOS	delta
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
2 basic		1	15	48,8	2	33,8	9,8	4	5,2
2 basic		1	-10	1,4	1	11,4	1,0	4	11,0
2 maxre		1	-20	18,4	1	38,4	-10,2	3	9,8
2 maxre		1	10	51,6	2	41,6	-1,4	3	11,4
2 inphase		1	0	47,9	1	47,9	7,7	3	7,7
2 inphase		1	20	61,7	1	41,7	1,7	4	18,3
				1,33	35,8		3,5	10,6	
				0,5	12,8		0,55	4,45	
5. Ordnung				außerhalb			innerhalb		
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
2 basic		5	20	15,7	4	4,3	20,5	2	0,5
2 basic		5	-10	-11,5	4	1,5	-6,4	3	3,6
2 maxre		5	-20	-25,9	4	5,9	-22,9	5	2,9
2 maxre		5	15	13,3	3	1,7	11,4	4	3,6
2 inphase		5	15	26,8	1	11,8	9,3	3	5,7
2 inphase		5	-15	-24,9	4	9,9	-10,4	3	4,6
				3,33	5,9		3,33	3,5	
				1,2	4,23		1,03	1,77	
Hochpass				außerhalb			innerhalb		
1. Ordnung				Azimuth	MOS	delta	Azimuth	MOS	delta
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
3 basic		1	15	48,0	1	33,0	8,0	2	7,0
3 basic		1	-15	14,6	1	29,6	-14,1	2	0,9
3 maxre		1	20	63,1	2	43,1	9,6	3	10,4
3 maxre		1	-15	3,9	2	18,9	-13,4	2	1,6
3 inphase		1	20	42,7	2	22,7	-7,8	2	27,8
3 inphase		1	-20	-5,5	1	14,5	-13,2	2	6,8
				1,5	27,0		2,17	9,1	
				0,5	10,4		0,41	9,83	
5. Ordnung				außerhalb			innerhalb		
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel						
3 basic		5	20	22,4	4	2,4	16,7	4	3,3
3 basic		5	-20	-20,5	4	0,5	-23,8	5	3,8
3 maxre		5	-10	-14,4	3	4,4	-7,6	3	2,4
3 maxre		5	15	7,7	3	7,3	-3,1	4	18,1
3 inphase		5	20	31,8	2	11,8	4,8	3	15,2
3 inphase		5	-15	-19,3	3	4,3	-18,8	2	3,8
				3,17	5,1		3,5	7,7	

Abbildung 47: Ergebnisse des ersten Vorversuch; Teil 1/2

Fullrange				außerhalb		innerhalb			
1. Ordnung				Azimuth	MOS	Azimuth	MOS		
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel	delta		delta			
1 basic		1	40	56,8	2	16,8	24,6	1	15,4
1 basic		1	-15	-12,2	1	2,8	-12,3	3	2,7
1 basic		1	10	30,7	2	20,7	-0,5	4	10,5
1 basic		1	0	15,7	1	15,7	-1,3	3	1,3
1 basic		1	-30	-28,5	2	1,5	-25,2	3	4,8
				1,6	11,514	2,8	6,91		
max r_E				<i>0,55</i>	<i>8,734</i>	<i>1,1</i>	<i>5,88</i>		
1 maxre		1	0	17,0	2	17,0	-0,4	3	0,4
1 maxre		1	40	68,6	2	28,6	-1,1	2	41,1
1 maxre		1	-10	12,4	1	22,4	-6,6	3	3,4
1 maxre		1	15	47,1	1	32,1	-0,9	3	15,9
1 maxre		1	-20	-21,5	3	1,5	-14,9	1	5,1
				1,8	20,319	2,4	13,2		
Inphase				<i>0,84</i>	<i>12,02</i>	<i>0,89</i>	<i>16,7</i>		
1 inphase		1	30	57,7	1	27,7	21,9	2	8,1
1 inphase		1	-40	-49,7	3	9,7	-24,0	2	16,0
1 inphase		1	0	52,3	2	52,3	1,1	3	1,1
1 inphase		1	15	63,3	2	48,3	11,8	2	3,2
1 inphase		1	-20	-22,9	2	2,9	-18,0	2	2,0
				2	28,195	2,2	6,08		
				<i>0,71</i>	<i>22,17</i>	<i>0,45</i>	<i>6,17</i>		
1. Ordnung gesamt				1,8	20,009	2,47	8,73		
				<i>0,68</i>	<i>15,91</i>	<i>0,83</i>	<i>10,5</i>		
3. Ordnung				außerhalb		innerhalb			
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel	Azimuth	MOS	Azimuth	MOS		
1 basic		3	20	27,9	2	7,9	5,3	3	14,7
1 basic		3	-15	-16,1	3	1,1	-10,8	3	4,2
1 basic		3	30	39,5	2	9,5	24,2	2	5,8
1 basic		3	-40	-37,6	3	2,4	-45,6	3	5,6
1 basic		3	0	-2,0	3	2,0	0,0	5	0,0
				2,6	4,5643	3,2	6,08		
max r_E				<i>0,55</i>	<i>3,807</i>	<i>1,1</i>	<i>5,36</i>		
1 maxre		3	0	-7,3	2	7,3	0,5	3	0,5
1 maxre		3	35	39,7	2	4,7	31,0	3	4,0
1 maxre		3	-10	0,8	4	10,8	-12,6	3	2,6
1 maxre		3	-25	-26,9	3	1,9	-30,5	4	5,5
1 maxre		3	15	8,5	3	6,5	2,6	4	12,4
				2,8	6,2477	3,4	4,98		
Inphase				<i>0,84</i>	<i>3,27</i>	<i>0,55</i>	<i>4,53</i>		
1 inphase		3	20	41,9	1	21,9	11,4	2	8,6
1 inphase		3	-15	-11,1	3	3,9	-10,6	2	4,4
1 inphase		3	35	44,4	2	9,4	24,7	1	10,3
1 inphase		3	-30	-33,3	3	3,3	-21,2	3	8,8
1 inphase		3	0	8,5	1	8,5	-0,6	4	0,6
				2	9,414	2,4	6,55		
				<i>1</i>	<i>7,466</i>	<i>1,14</i>	<i>4,01</i>		
3. Ordnung gesamt				2,47	6,742	3	5,87		
				<i>0,83</i>	<i>5,24</i>	<i>1</i>	<i>4,37</i>		
5. Ordnung				außerhalb		innerhalb			
Signal	Dekoder	Ordnung	Winkel	Azimuth	MOS	Azimuth	MOS		
1 basic		5	-30	-30,1	2	0,1	-38,0	5	8,0
1 basic		5	40	32,9	3	7,1	40,9	4	0,9
1 basic		5	-10	-23,2	3	13,2	-16,5	3	6,5
1 basic		5	0	-4,3	4	4,3	-0,1	5	0,1
1 basic		5	10	9,5	3	0,5	-0,7	4	10,7
				3	5,0518	4,2	5,23		
max r_E				<i>0,71</i>	<i>5,396</i>	<i>0,84</i>	<i>4,57</i>		
1 maxre		5	-25	-27,3	4	2,3	-25,2	4	0,2
1 maxre		5	0	5,7	4	5,7	-1,5	3	1,5
1 maxre		5	10	11,5	3	1,5	3,6	4	6,4
1 maxre		5	30	21,2	3	8,8	29,5	3	0,5
1 maxre		5	-15	-20,2	3	5,2	-15,6	4	0,6
				3,4	4,6985	3,6	1,85		
Inphase				<i>0,55</i>	<i>2,935</i>	<i>0,55</i>	<i>2,59</i>		
1 inphase		5	-10	-19,1	2	9,1	-10,8	3	0,8
1 inphase		5	10	4,5	2	5,5	1,3	4	8,7
1 inphase		5	20	30,8	3	10,8	7,3	4	12,7
1 inphase		5	0	-5,2	1	5,2	-1,3	4	1,3
1 inphase		5	-20	-26,9	4	6,9	-16,6	3	3,4
				2,4	7,511	3,6	5,39		
				<i>1,14</i>	<i>2,405</i>	<i>0,55</i>	<i>5,14</i>		
5. Ordnung gesamt				2,93	5,7538	3,8	4,15		
				<i>0,88</i>	<i>3,756</i>	<i>0,68</i>	<i>4,27</i>		

Abbildung 48: Ergebnisse des ersten Vorversuch; Teil 2/2

1. Ordnung			Sweetspot kompensiert		Sweetspot nicht kompensiert		außerhalb kompensiert	
Basic Dekoder	Ordnung Winkel		MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta
basic	1 40		2	58,3 18,3	2	15,9 24,1	4	60,0 20
basic	1 -15		1	-26,2 11,2	2	-14,0 0,97	1	-7,8 7,19
basic	1 10		2	18,0 7,95	1	15,6 5,57	3	53,4 43,4
basic	1 0		1	0,6 0,6	1	12,7 12,7	1	37,4 37,4
basic	1 -30		2	-29,4 0,63	3	-22,3 7,7	1	-5,8 24,2
			Mittelwert	1,6 7,74	1,8 2,8 10,2 6,9	2 1,6 26,4 11,5		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,5 7,51</i>	<i>0,8 1,1 8,82 5,9</i>	<i>1,41 0,6 14,4 8,7</i>		
Max rE								
max rE	1 40		1	54,1 14,1	2	27,9 12,1	2	71,6 31,6
max rE	1 -10		2	-16,6 6,55	1	-10,9 0,87	2	43,3 53,3
max rE	1 -20		2	-31,9 11,9	3	-14,0 5,97	1	13,7 33,7
max rE	1 15		2	29,8 14,8	1	8,2 6,79	3	52,7 37,7
max rE	1 0		1	2,3 2,32	2	9,2 9,16	2	50,4 50,4
			Mittelwert	1,6 9,93	1,8 2,4 6,97 13,2	2 1,8 41,3 20,3		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,5 5,35</i>	<i>0,8 0,9 4,16 16,7</i>	<i>0,71 0,8 9,9 12</i>		
Mixed								
mixed	1 -20		1	-32,5 12,5	2	-19,2 0,81	1	-17,1 2,85
mixed	1 40		1	55,0 15	1	25,1 14,9	4	70,7 30,7
mixed	1 -10		1	-24,6 14,6	1	-10,3 0,34	1	10,7 20,7
mixed	1 0		1	0,5 0,47	1	9,7 9,71	1	24,5 24,5
mixed	1 30		2	40,4 10,4	2	25,7 4,35	2	65,0 35
			Mittelwert	1,2 10,6	1,4 6,02	1,8 22,8		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,4 5,94</i>	<i>0,5 6,21</i>	<i>1,3 12,4</i>		
Inphase								
inphase	1 -40		1	-44,1 4,13	1	-30,2 9,83	1	-24,3 15,7
inphase	1 -20		3	-34,0 14	2	-24,6 4,63	1	-28,9 8,86
inphase	1 0		1	29,0 29	1	1,5 1,46	2	54,1 54,1
inphase	1 15		3	31,6 16,6	1	19,2 4,17	2	62,8 47,8
inphase	1 30		2	45,4 15,4	1	17,6 12,4	3	68,3 38,3
			Mittelwert	2 15,8	1,2 2,2 6,5 6,1	1,8 2,0 33 28,2		
			<i>Standardabw.</i>	<i>1 8,87</i>	<i>0,4 0,5 4,48 6,2</i>	<i>0,84 0,7 19,8 22,2</i>		
			Gesamt	1,6 11	1,55 2,5 7,42 8,7	1,9 1,8 30,9 20		
				<i>0,7 7,15</i>	<i>0,7 0,8 5,93 10,5</i>	<i>1,02 0,7 15,2 15,9</i>		

3. Ordnung			Sweetspot kompensiert		Sweetspot nicht kompensiert		außerhalb kompensiert	
Basic Dekoder	Ordnung Winkel		MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta
basic	3 -15		5	-23,2 8,2	4	-10,0 5,0	3	1,4 16,4
basic	3 30		4	43,0 13,0	3	38,0 8,0	4	63,5 33,5
basic	3 20		4	21,8 1,8	3	18,6 1,4	2	42,6 22,6
basic	3 -40		5	-47,6 7,6	4	-32,2 7,8	2	-30,1 9,9
basic	3 0		4	0,5 0,5	2	-0,1 0,1	2	4,1 4,1
			Mittelwert	4,4 6,21	3,2 3,2 4,49 6,1	2,6 2,6 17,3 4,6		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,5 5,09</i>	<i>0,8 1,1 3,62 5,4</i>	<i>0,89 0,6 11,4 3,8</i>		
Max rE								
max rE	3 35		4	50,4 15,4	3	49,0 14,0	4	53,3 18,3
max rE	3 -10		2	-17,6 7,6	3	-13,4 3,4	4	-1,3 8,7
max rE	3 15		3	18,1 3,1	3	18,8 3,8	2	33,5 18,5
max rE	3 0		3	-7,1 7,1	3	0,6 0,6	5	21,5 21,5
max rE	3 -25		2	-26,3 1,3	3	-26,6 1,6	3	-12,9 12,1
			Mittelwert	2,8 6,9	3 3,4 4,66 5	3,6 2,8 15,8 6,2		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,8 5,48</i>	<i>0 0,6 5,36 4,5</i>	<i>1,14 0,8 5,26 3,3</i>		
Mixed								
mixed	3 -25		4	-30,2 5,2	4	-23,1 1,9	4	-15,6 9,4
mixed	3 40		5	45,3 5,3	3	48,4 8,4	4	62,8 22,8
mixed	3 10		2	18,2 8,2	2	10,1 0,1	2	33,1 23,1
mixed	3 0		3	0,4 0,4	3	4,1 4,1	3	10,4 10,4
mixed	3 -15		4	-16,4 1,4	4	-11,1 3,9	1	-5,1 9,9
			Mittelwert	3,6 4,11	3,2 3,67	2,8 15,1		
			<i>Standardabw.</i>	<i>1,1 3,19</i>	<i>0,8 3,11</i>	<i>1,3 7,15</i>		
Inphase								
inphase	3 20		2	35,1 15,1	3	22,3 2,3	2	57,1 37,1
inphase	3 -15		2	-19,9 4,9	1	-5,7 9,3	2	-6,1 8,9
inphase	3 0		2	0,3 0,3	3	13,1 13,1	1	17,6 17,6
inphase	3 -30		1	-34,2 4,2	3	-28,5 1,5	1	-23,8 6,2
inphase	3 35		2	51,9 16,9	3	53,7 18,7	4	69,6 34,6
			Mittelwert	1,8 8,27	2,6 2,4 8,98 6,6	2 2,0 20,9 9,4		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,4 7,26</i>	<i>0,9 1,1 7,28 4</i>	<i>1,22 1,0 14,3 7,5</i>		
			Gesamt	3,15 6,37	3 3,0 5,45 5,9	2,75 2,5 17,3 6,7		
				<i>1,2 5,23</i>	<i>0,7 1,0 5,15 4,4</i>	<i>1,21 0,8 9,61 5,2</i>		

5. Ordnung			Sweetspot kompensiert		Sweetspot nicht kompensiert		außerhalb kompensiert	
Basic Dekoder	Ordnung Winkel		MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta
basic	5 0		5	0,9 0,9	5	0,2 0,2	3	13,9 14
basic	5 10		4	15,0 5,0	4	12,6 2,6	4	30,8 21
basic	5 -30		5	-24,1 5,9	4	-24,6 5,4	4	-23,6 6
basic	5 40		5	45,6 5,6	5	45,1 5,1	5	45,8 6
basic	5 -10		4	-17,2 7,2	4	-8,8 1,2	4	-11,0 1,1
			Mittelwert	4,6 4,92	4,4 4,2 2,92 5,2	4 3,0 9,57 5,1		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,5 2,36</i>	<i>0,5 0,8 2,31 5,6</i>	<i>0,71 0,7 7,77 5,4</i>		
Max rE								
max rE	5 10		4	17,3 7,3	4	9,0 1,0	4	19,7 10
max rE	5 0		4	0,2 0,2	3	1,8 1,8	3	2,7 3
max rE	5 -25		5	-23,5 1,5	3	-18,1 6,9	4	-18,3 7
max rE	5 30		4	41,4 11,4	3	35,8 5,8	4	46,0 16
max rE	5 -15		4	-21,4 6,4	2	-13,0 2,0	4	-5,7 9
			Mittelwert	4,2 5,37	3 3,6 3,5 1,9	3,8 3,4 8,87 4,7		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,4 4,55</i>	<i>0,7 0,6 2,65 2,6</i>	<i>0,45 0,6 4,88 2,9</i>		
Mixed								
mixed	5 -10		5	-21,9 11,9	4	-3,1 6,9	5	0,3 10
mixed	5 -40		5	-47,7 7,7	4	-37,9 2,1	4	-36,5 4
mixed	5 30		4	41,1 11,1	4	41,3 11,3	5	43,9 14
mixed	5 0		5	0,2 0,2	4	0,4 0,4	3	25,2 25
mixed	5 15		4	22,7 7,7	4	22,4 7,4	5	21,3 6
			Mittelwert	4,6 7,73	4 5,6	4,4 11,8		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,5 4,64</i>	<i>0 4,37</i>	<i>0,89 8,42</i>		
Inphase								
inphase	5 10		3	13,0 3,0	3	14,9 4,9	2	49,4 39
inphase	5 -20		2	-26,4 6,4	4	-17,1 2,9	2	-7,6 12
inphase	5 -10		2	-9,4 0,6	1	-5,6 4,4	3	-7,7 2
inphase	5 0		1	0,3 0,3	1	8,3 8,3	3	14,7 15
inphase	5 20		1	38,5 18,5	3	21,4 1,4	4	46,5 27
			Mittelwert	1,8 5,77	2,4 3,6 4,36 5,4	2,8 2,4 19,1 7,5		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0,8 7,51</i>	<i>1,3 0,6 2,56 5,1</i>	<i>0,84 1,1 14,3 2,4</i>		
			Gesamt	3,8 5,95	3,45 3,8 4,1 4,2	3,75 2,9 12,3 5,8		
				<i>1,3 4,81</i>	<i>1,1 0,7 3,01 4,3</i>	<i>0,91 0,9 9,63 3,8</i>		

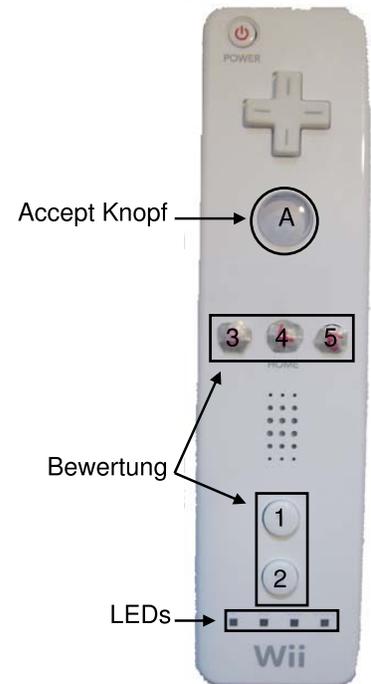
Rael			Sweetspot (kompensiert)		Sweetspot (nicht kompensiert)		außerhalb kompensiert	
Dekoder	Ordnung Winkel		MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta	MOS	angezeigt Delta
real	12 0		5	-0,4 0,4	5,0	0,3 0,3	5,0	0,6 0,6
real	12 21,4		5	22,1 0,7	5,0	23,2 1,8	5,0	21,5 0,1
real	12 -23,7		5	-22,6 1,1	5,0	-22,9 0,8	5,0	-26,0 2,3
			Mittelwert	5 0,75	5 5,0 0,98 2,8	5 5,0 1 3,9		
			<i>Standardabw.</i>	<i>0 0,34</i>	<i>0 0,0 0,79 4</i>	<i>0 0,0 1,14 2,9</i>		

Abbildung 49: Ergebnisse des zweiten Vorversuch; grün: Vergleichswerte des ersten Vorversuch

TI-Projekt: Hörversuche zur Ortung/Lokalisation bei verschiedenen Ambisonic-Dekodern

Ablauf einer einzelnen Messung:

- Einnehmen der Abhörposition
- Wiedergabe des Stimulus, während dessen darf die Position nicht geändert werden bzw. der Kopf bewegt werden (Kontrolle über Headtracking mit gewissem Toleranzbereich)
- bei zu starken Bewegungen wird der Stimulus wiederholt
- **NACH** der Wiedergabe wird gezielt und der Abzug betätigt
- Bewertung der Lokalisationsschärfe (Punktesystem von 1 bis 5, wobei 1 die schlechteste und 5 die beste Lokalisationsschärfe bedeutet, **keine Noten!**)
- Überprüfen der Bewertung über die LEDs (LED 1: Bewertung 1, LED 2: Bewertung 2, ...alle LEDs: Bewertung 5)
- durch Betätigen des Accept-Knopfes (A) wird der Datensatz gespeichert. Bis dahin sind noch Änderungen der Bewertung möglich
- bevor der nächste Stimulus startet, wird nochmals die korrekte Sitzposition überprüft



Ablauf des Gesamtversuchs:

- Zielübung auf optische Ziele zum Kennenlernen des Interfaces
- Einnehmen der ersten Abhörposition (Sweetspot)
- Zuspiegelung von mehreren Stimuli zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung
- Einnehmen der zweiten Abhörposition (außerhalb des Sweetspots)
- Zuspiegelung von mehreren Stimuli zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung
- Die Basis der Wertung soll sich dabei aus den Eindrücken **beider** Abhörpositionen zusammensetzen
- Einnehmen der ersten Abhörposition (Sweetspot)
- Beginn der Messungen des ersten Teilversuchs

PAUSE (ca. 10 Minuten)

- Einnehmen der ersten Abhörposition (Sweetspot)
- Zuspiegelung von mehreren Stimuli zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung
- Einnehmen der zweiten Abhörposition (außerhalb des Sweetspots)
- Zuspiegelung von mehreren Stimuli zur Bildung einer Basis/Referenz für die Bewertung
- Die Basis der Wertung soll sich dabei aus den Eindrücken **beider** Abhörpositionen zusammensetzen. Dieser Kalibrierungsvorgang wird vor dem zweiten Teilversuch wiederholt, um beide Versuche auf einer möglichst gleichen Basis zu bewerten.
- Einnehmen der zweiten Abhörposition (außerhalb des Sweetspots)
- Beginn der Messungen der zweiten Teilversuchs

Vielen Dank für die Teilnahme!

Matthias Frank

Betreuer: Franz Zotter/Alois Sontacchi