



Lokalisation von Schallquellen in der Horizontalebene im virtuellen Surround

Masterarbeit im Studiengang Elektronische Medien
Hochschule der Medien Stuttgart

Isabell Triebisch
Matrikel-Nr.: 19055

Abgabetermin: 22.03.2010

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt
Zweitprüfer: Prof. Thomas Görne

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Räumliches Hören realer Schallquellen	9
2.1. Das menschliche Gehör	9
2.2. Das kopfbezogene Koordinatensystem	10
2.3. Interaurale Pegel-, Laufzeit- und spektrale Differenzen	11
2.4. Blauertsche Bänder	12
2.5. HRTF	12
2.6. Lokalisation	13
3. Räumliches Hören bei elektroakustischer Wiedergabe und technische Lösungen	15
3.1. Stereo	15
3.1.1. Pegeldifferenzen	16
3.1.2. Laufzeitdifferenzen	16
3.1.3. Zusammenspiel von Pegel- und Laufzeitdifferenzen	16
3.2. Geschlossene Räume	17
3.3. Summenlokalisation und Assoziationsmodell	17
3.4. Kopfhörer-Wiedergabe	18
3.4.1. Kopfhörer und ihre Vor- und Nachteile	18
3.4.2. Arbeitsprinzipien	19
3.4.3. Kunstkopf	19
3.4.4. Diffusfeldentzerrung	20
3.5. Surround	21
3.5.1. Virtuelles Surround	22
3.5.2. Kopfhörer-Surround-Systeme	23
3.5.2.1. Binaural Sky	23
3.5.2.2. Phönix 5.1	23
3.5.2.3. Headzone PRO XT	23
4. Hörversuch	27
4.1. Idee	27
4.2. Vorbereitungen	27
4.2.1. Signal	27
4.2.2. Fragebogen	28
4.2.3. Probanden	29
4.2.4. Vorversuche	30
4.2.5. Headzone-Einrichtung	30
4.2.6. Vorbereitungen des Raumes	30
4.3. Ablauf und Durchführung	34
4.4. Ergebnisse und Auswertungen	36
4.4.1. Persönliche Angaben der Probanden	36
4.4.2. Test auf Urteilssicherheit	37
4.4.3. Lokalisation und Lokalisationsschärfe	37
4.4.3.1. Vorderer Bereich	38

4.4.3.2.	Seitlicher Bereich	40
4.4.3.3.	Hinterer Bereich	43
4.4.3.4.	Einfluss der Tonerfahrung auf das Lokalisationsvermögen der Probanden	45
4.4.3.5.	Zusammenhang zwischen empfundener und tatsächlicher Lo- kalisierungsschärfe	45
4.4.4.	Fehllokalisationen	46
4.4.4.1.	Definition und Auftreten des Vorne-Hinten-Fehlers sowie des Links-Rechts-Fehlers	46
4.4.4.2.	Im-Kopf-Lokalisation	48
4.4.4.3.	Fehlende Angaben	49
4.4.4.4.	Doppelte Angaben	49
5.	Zusammenfassung	50
	Literaturverzeichnis	51
A.	Diagramme zu 4.4	54
A.1.	persönliche Angaben der Probanden	54
A.2.	Test auf Urteilssicherheit	56
A.3.	Lokalisation und Lokalisationsschärfe	56
A.3.1.	Einfluss der Tonerfahrung auf das Lokalisationsvermögen der Probanden	56
A.3.2.	Zusammenhang zw. empfundener und tatsächlicher Lokalisationsschärfe	59
A.3.3.	Fehllokalisationen	63
A.3.3.1.	Definition und Auftreten des Vorne-Hinten-Fehlers sowie des Links-Rechts-Fehlers	63

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Das menschliche Gehör [15]	9
2.2.	Das kopfbezogene Koordinatensystem [6]	10
2.3.	Blauertsche Bänder [6]	12
2.4.	Aus je zehn Messungen gemittelte Kurven für unterschiedliche Schalleinfallrichtungen: 0°, 45°, 90°, 180°, 270°, 315°. Skalierung der Frequenzachse 200 Hz bis 15 kHz ([16], nach Shaw 1966)	13
3.1.	zwei Lautsprecher in Stereo-Standardaufstellung [6]	15
3.2.	Assoziationsmodell nach Theile [45]	18
3.3.	Kunstkopf KU 100 der Firma Neumann [27]	20
3.4.	Surround-Anordnung nach ITU-R BS.755-1 [20]	21
3.5.	Links: Headzone PRO mit dem Kopfhörer DT 880 Pro HT. Rechts: Headzone PRO XT HT mit dem Kopfhörer DT 770 PRO HT [2]	24
3.6.	Wirkungsbereich des Headtrackers vom Headzone PRO XT HT [3]	25
4.1.	Frequenzgang des aufgenommenen Signals (Momentaufnahme)	28
4.2.	Fragebogen	29
4.3.	vorbereiteter Raum: Tonstudio der Hochschule der Medien	31
4.4.	Sichtfeld des Probanden während des Versuchs	31
4.5.	Arbeitsplatz der Versuchsleiterin aus Sicht des Probanden	32
4.6.	Center-Lautsprecher mit Blickfang	32
4.7.	Kopfhörer DT 880 HT mitUltraschall-Sender	32
4.8.	Ultraschall-Empfänger	33
4.9.	Headzone-Basisstation	33
4.10.	Lokalisation im vorderen Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L	38
4.11.	Lokalisation im vorderen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L	39
4.12.	Lokalisation im vorderen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L	40
4.13.	Lokalisation im seitlichen Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS	41
4.14.	Lokalisation im seitlichen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS	42
4.15.	Lokalisation im seitlichen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS	42
4.16.	Lokalisation im hinteren Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für RS-LS	43
4.17.	Lokalisation im hinteren Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für RS-LS	44
4.18.	Lokalisation im hinteren Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für RS-LS	45
A.1.	Alter der Probanden in Klassen unterteilt	54
A.2.	Geschlecht der Probanden	54

A.3. Berufe der Probanden	55
A.4. Tonerfahrung der Probanden	55
A.5. Richtung des Hörereignisses bei 0°-Schalleinfall über Lautsprecher	56
A.6. Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich	56
A.7. Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich	57
A.8. Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich	57
A.9. Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich	57
A.10. Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlicher Bereich	58
A.11. Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlicher Bereich	58
A.12. Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich	58
A.13. Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich	59
A.14. Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und vorderem Bereich	59
A.15. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und vorderem Bereich	60
A.16. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich	60
A.17. Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlichem Bereich	60
A.18. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und seitlichem Bereich	61
A.19. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und seitlichem Bereich	61
A.20. Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich	61
A.21. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und hinterem Bereich	62
A.22. Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich	62
A.23. Boxplot für die Fehlerdefinition	63
A.24. Verteilung des Links-Rechts-Fehlers	63

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Lokalisation von Schallquellen in der Horizontalebene im virtuellen Surround“ selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z.B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Stuttgart, den 22. März 2010

Isabell Triebisch

Abstract

Der 5.1-Standard der Lautsprecherwiedergabe hat sich mittlerweile nicht nur in professionellen Tonstudios und Kinosälen etabliert, durch die Distribution einfacher Consumeranlagen findet er auch immer häufiger Anwendung im Heimbereich. Hieraus entsteht das Bedürfnis, auch für Broadcast-Formate und insbesondere Live-Übertragungen hochqualitative Mischungen zu erzielen. Ohne die Möglichkeit einer Bearbeitung des Audiomaterials in einer echten Surroundregie entfällt jedoch die wichtige Echtzeitmischung, die z.B. im Übertragungswagen abgewickelt werden muss und die Tontechniker vor Ort können sich nur auf Erfahrungswerte berufen. Sie sind dadurch wenig handlungsfähig und können nur bedingt auf die Mischung eingreifen. Besonders im Bereich der Konzert- und Sportübertragungen fürs Fernsehen gibt es oft keine mit Surroundsystemen ausgestatteten Regien. Darüber hinaus muss auch häufig in lauten Umgebungen gearbeitet werden. All diese Ansprüche führten innerhalb der letzten Jahre zur Entwicklung von simulativen Kopfhörersystemen, die sich theoretisch optimal für vergleichbare Anwendungen eignen. Diese kopfhörerbasierten Abhörsysteme werden als „virtuelles Surround“ bezeichnet und simulieren in Echtzeit reale Surroundregien mithilfe der Einbindung von HRTF-Datensätzen. Zusätzlich verwendet das System die Erkenntnisse zur menschlichen Richtungswahrnehmung, der Lokalisation von Schallquellen. Die Arbeit untersucht exemplarisch am Beispiel der Lösung des virtuellen Kopfhörersystems Headzone PRO XT der Firma Beyerdynamik, wie repräsentativ eine Simulation einer echten Surroundabhöre funktionieren kann. Bei der Auswertung der hierfür durchgeführten Hörversuche ergibt sich ein differenziertes Bild. Funktioniert die Richtungsabbildung des Systems bei einer Großzahl bekannter Signale einwandfrei, so gibt es vor allem Einschränkungen im Bereich der Vorne-Hinten-Lokalisation sowie der problematischen Im-Kopf-Lokalisation. Die Fehllokalisationen und die richtungsabhängige Lokalisationsschärfe der Hörereignisse können durch das eingebaute Headtracking-System verbessert werden. Weitere Verbesserungsansätze der genannten Wiedergabeproblematiken sollten sich zunächst auf die Mittelungsverfahren der HRTF-Datensätze konzentrieren, da sich dahinter die diffizilste Mensch-Technik-Schnittstelle des Systems befindet.

1. Einleitung

Motivation

Während des Masterstudiums habe ich mich intensiv mit dem Thema Surround auseinandergesetzt, sowohl aufnahme- als auch wiedergabeseitig. Dabei ist der Wunsch entstanden, auch meiner Masterarbeit diesem Themengebiet zu widmen. In Vorbereitung meiner Masterarbeit habe ich mit einigen Fachleuten aus dieser Branche, wie z.B. Prof. Thomas Görne, gesprochen, wodurch die Idee entstand virtuelles Surround und die Lokalisation darin zu untersuchen. Die Masterarbeit bietet genau den richtigen Rahmen dafür und die Hochschule der Medien mit ihrem neuen Tonstudio und ihrem modernen Equipment die optimalen Bedingungen um den praktischen Teil der Arbeit, den Hörversuch, zu realisieren. Virtuelles Surround ist ein aktuelles Thema, welches ständigen Weiterentwicklungen unterliegt. Die Firma Beyerdynamic hat sich dieser Weiterentwicklung angenommen und Headzone PRO XT HT entwickelt: „Das erste mobile Kopfhörersystem, das professionelles Monitoring mit einer virtuellen 5.1-Wiedergabe ermöglicht“ [2]. Speziell wurde Headzone PRO entwickelt für das Broadcast-Monitoring, also live Surround Mischungen im Ü-Wagen wie z.B. bei Olympia 2010 in Vancouver.

Ziele der Arbeit

Der Mensch hat zwei Ohren, mit denen er räumlich hören kann. Er bekommt durch die Ohren auch nur zwei Signale. Daher muss es auch möglich sein mit zwei Schallquellen, in diesem Fall die Lautsprecher im Kopfhörer des Headzone PRO XT HT, Surround zu simulieren. Genau mit diesem Thema beschäftigt sich diese Arbeit. Sie will zum Einen herausfinden, ob das System vergleichbare Ergebnisse mit einer realen Surround-Anordnung über Lautsprecher liefert, und zum Anderen, ob Headtracking die Lokalisation verbessert. Headzone PRO XT HT arbeitet mit „Headtracking für perfekte Lokalisation und stabilen Raumeindruck“ [2], um eine echte virtuelle Realität zu schaffen, egal wo man gerade ist.

Vorgehensweise

Um Antworten auf die gestellten Fragen zu bekommen, wurden mit verschiedenen Probanden Hörversuche sowohl mit Lautsprechern als auch mit Headzone Pro XT HT durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden absichtlich keine Thesen aufgestellt um eine Beeinflussung derer auf die Arbeit zu verhindern. Vielmehr soll diese Arbeit kritisch hinterfragen und allgemeingültige Aussagen schaffen. Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen des räumlichen Hörens und des Surround erläutert sowie die Technik des Headzone Pro XT HT vorgestellt. Daran anschließend werden im praktischen Teil der Arbeit Idee, Vorbereitungen, Durchführung und Auswertung des Hörversuches dargelegt; eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse des Hörversuchs rundet die Arbeit ab.

2. Räumliches Hören realer Schallquellen

Um reales und virtuelles Surround verstehen, entwickeln und bewerten zu können, muss man das räumliche Hören des Menschen und die damit verbundenen Phänomene verstehen. Deswegen werden im folgenden Kapitel die wichtigsten theoretischen Grundlagen des räumlichen Hörens bei einer Schallquelle im freien Schallfeld beschrieben. Die Ausführungen in den Kapiteln 2 und 3 beziehen sich auf Werke renommierter Autoren, stammen aus den folgenden Büchern und werden explizit im Text nicht noch einmal genannt: „Räumliche Hören“ von J. Blauert [6], „Handbuch der Tonstudioteknik“ von M. Dickreiter [10], [11], „Wahrnehmungspsychologie“ von E. B. Goldstein [15] und „Tontechnik“ von T. Görne [16]. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Arbeit nur von breitbandigen Signalen, wie z.B. Sprache, ausgeht und sämtliche Angaben sich darauf beziehen.

2.1. Das menschliche Gehör

Das menschliche Gehör ist ein komplexes System, das aus dem Außenohr (Ohrmuschel und Gehörgang), Mittelohr (Paukenhöhle mit Trommelfell und Gehörknöchelchen) und Innenohr (Cochlea und Hörnerv) besteht (siehe Abbildung 2.1).

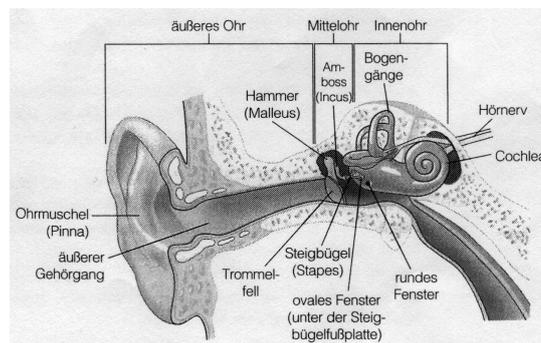


Abbildung 2.1.: Das menschliche Gehör [15]

Das äußere Ohr spielt bei der Lokalisation von Schallquellen eine wichtige Rolle. Der Klang des ankommenden Signals wird durch die Ohrmuschel und den Kopf verändert, d.h. bestimmte Frequenzen werden je nach Einfallsrichtung, Entfernung und Signalart verstärkt oder abgeschwächt (siehe Kapitel 2.5.). Im Innenohr werden Druckunterschiede des Schallereignisses in elektrische Signale umgewandelt, über den Hörnerv an das Gehirn weitergeleitet, dort verarbeitet und als Hörereignis bewusst wahrgenommen. Dies geschieht, indem der Reiz mit im Gehirn gespeicherten Reizmustern verglichen wird. Eine Übereinstimmung führt zur Lokalisation der Schallquelle. Der Lernprozess spielt dabei eine wichtige Rolle. Bekannte Signale werden schärfer lokalisiert. Zusätzlich werden über andere Sinne, wie z.B. das Sehen, Informationen gewonnen, die bei der Lokalisation helfen.

Zunächst werden zentrale Begriffe der Arbeit definiert und voneinander abgegrenzt, um das Verständnis der nachfolgenden Erläuterungen zu ermöglichen. Hierbei orientiert sich die Arbeit an den von Blauert ([6], S. 2) festgelegten Terminologien. Demnach beziehen sich alle Begriffe, die mit dem Wort „Schall-“ beginnen, auf die physikalische Seite des Hörvorgangs, wie z.B. das

Schallereignis oder die Schallquelle, und alle Begriffe, die mit „Hör-“ beginnen, auf das akustisch Wahrgenommene, das Gehörte, wie z.B. das Hörereignis. Hörereignisse und Schallereignisse treten nicht immer gemeinsam auf. Das Schallereignis ruft nicht automatisch das passende Hörereignis hervor. Man kann sie nur unter bestimmten Voraussetzungen einander zuordnen. Beide haben bestimmte räumliche, zeitliche und eigenschaftliche Merkmale.

Laut Blauert ([51], S. 75) ist das Hörorgan ein System, das auf die Erregung durch ein bestimmtes physikalisches Signal (einem Schallereignis) mit der Erzeugung eines bestimmten akustisch Wahrgenommenen (einem Hörereignis) reagiert. Das Schallereignis ist ein Reiz, der eindeutig physikalisch definierbar ist. Seine Gestalt wird auf dem Weg zum Gehirn verändert und zu einem Hörereignis umgewandelt, welches eine Empfindung darstellt. Empfindungen sind nicht physikalisch definierbar und sind bei jedem Menschen unterschiedlich. Deshalb kann man die beiden Größen nicht direkt miteinander vergleichen. Jeder Mensch hört anders und kein Ohrenpaar gleicht dem anderen. Den Zusammenhang zwischen den beiden Größen kann man somit nicht messen, aber durch Hörversuche psychoakustisch untersuchen und statistisch erfassen. Diese können sich nur auf ein Merkmal beziehen, da man sich immer nur auf ein bestimmtes Merkmal konzentrieren kann. Demzufolge beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Lokalisation, d.h. der Richtung des Hörereignisses, und nicht der Entfernung, der Beschaffenheit oder anderer Merkmale.

2.2. Das kopfbezogene Koordinatensystem

Der Mensch kann einem Schallereignis ein entsprechendes Hörereignis zuordnen. Um die Richtung des Hörereignisses beschreiben zu können, wird das kopfbezogene Koordinatensystem zur Hilfe genommen, welches in Horizontal- (Seitenlokalisierung), Median- (Höhenlokalisierung) und Frontalebene (Tiefenlokalisierung) eingeteilt ist (siehe Abbildung 2.2). Die Position der wahrgenommenen Schallquelle wird in der Horizontalebene als Azimut (meist negativ, da im Uhrzeigersinn von links nach rechts), in der Medianebene als Elevation (von oben nach unten) und in der Frontalebene als Entfernung (die Distanz einer Schallquelle vom Zuhörer) angegeben. Die 0° -Achse des Systems ist die Richtung waagrecht nach vorne. Sobald die Schallquelle nicht mehr auf der 0° -Achse der Horizontalebene liegt, führen hauptsächlich Pegel- und Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Ohrsignalen zu einer Lokalisation des Hörereignisses, da die interauralen (zweiohrigen) Signale bei seitlichem Schalleinfall nicht mehr gleich sind, sondern sich je nach Einfallrichtung und Entfernung der Schallquelle unterscheiden. Diese Signalunterschiede werden im Folgenden kurz erläutert.

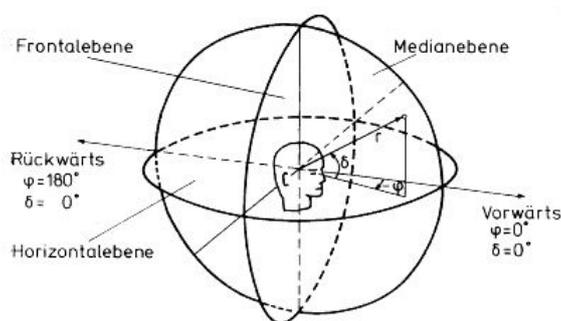


Abbildung 2.2.: Das kopfbezogene Koordinatensystem [6]

2.3. Interaurale Pegel-, Laufzeit- und spektrale Differenzen

Interaurale Pegeldifferenzen (ILD = interaural level difference) sind Unterschiede der mittleren Schalldruckpegel der Signale an beiden Ohren, die durch Beugung, Reflexion und Abschattung durch Kopf, Haare und Ohren entstehen. Bei seitlichem Schalleinfall wird der Schall abhängig von der Wellenlänge um den Kopf gebeugt, reflektiert oder absorbiert. Wenn man von einem durchschnittlichen Kopfdurchmesser von 17 cm ausgeht, werden Frequenzen ab 2 kHz reflektiert und Frequenzen, die darunter liegen, um den Kopf gebeugt. Bei Reflexion des Schalls entsteht am zugewandten Ohr ein Druckstau und am abgewandten Ohr ein Schallschatten, d.h. der Pegel kommt dort reduziert an. ILD sind stark frequenzabhängig. Bei Frequenzen kleiner 300 Hz kommen keine Pegeldifferenzen zustande, da die Schallwellen um den Kopf gebeugt werden. Bei Frequenzen größer 300 Hz nehmen die Differenzen mit den Frequenzen zu; wie stark und regelmäßig hängt von der Signalart ab.

Interaurale Laufzeitdifferenzen (ITD = interaural time differences) sind Unterschiede der beiden Ohrsignale bezüglich des Zeitpunktes ihres Eintreffens. Sie sind die wichtigsten Merkmale der Ohrsignale für die Lokalisation. Die Differenz ist die Zeitspanne, die der Schall braucht, um am abgewandten Ohr anzukommen. Je weiter seitlich sich die Schallquelle befindet, desto größer ist die Zeitdifferenz. Zur Feststellung der Laufzeitunterschiede orientiert sich das Ohr am Schwingungsverlauf. Bis zu einem Zeitunterschied von 0,61 ms erhöht sich die seitliche Lokalisation etwa proportional mit der Zeitänderung. Bei einem Schalleinfallswinkel von 90° kommt der Schall zuerst am zugewandten Ohr an. Die maximale Zeitdifferenz, die der Schall zum abgewandten Ohr benötigt, liegt bei 0,61 ms, wenn man einen durchschnittlichen Kopfumfang von ca. 17 cm zugrunde legt. Danach ändert sich die seitliche Auslenkung nur noch minimal oder gar nicht. 0,61 ms entspricht einem Wegunterschied von 21 cm (Hornbostel-Wertheimersche Konstante). Diese Strecke entspricht etwa der maximalen Wegdifferenz für einen seitlich einfallenden Schall zu beiden Ohren. Der minimalste noch wahrnehmbare Zeitunterschied beträgt 0,01 ms.

Diese beiden interauralen Signalunterschiede treten beim räumlichen Hören natürlicher, breitbandiger Signale stets gemeinsam auf. Für die Lokalisation von Schall aus seitlicher Richtung wertet das Gehirn beide Differenzen aus. Sie führen somit beide zu einer seitlichen Auslenkung. Der komplexe Zusammenhang zwischen beiden Signaldifferenzen hängt von der Art des Schallsignals ab und lässt sich vereinfacht folgendermaßen darstellen: Unter 1,6 kHz wertet das Gehör interaurale Laufzeitdifferenzen für die Lokalisation aus. Wenn das Signal keine Anteile oberhalb 1,6 kHz aufweist, ist der Einfluss der Laufzeitdifferenzen auf die Hörereignisauslenkung wesentlich; die Pegeldifferenzen spielen dann dabei keine Rolle. Wenn Frequenzen über 1,6 kHz, also wenn diese hohen Frequenzen wesentlicher Bestandteil des Signals sind, dominieren die interauralen Pegeldifferenzen und die interauralen Laufzeitdifferenzen der Signal-Hüllkurven die Hörereignisauslenkung. Im täglichen Leben weisen die wichtigsten Schallsignale, wie z.B. Sprache, Frequenzen oberhalb von 1,6 kHz auf.

Die Elevation in der Medianebene hat im Unterschied zur Einfallrichtung in Horizontalebene keine nennenswerten Auswirkungen auf die Lokalisation von Schallereignissen. Schallquellen auf 0° und 180° haben den gleichen Abstand zu beiden Ohren und aufgrund der Symmetrie des Kopfes sind beide Ohrsignale sehr ähnlich; es entstehen somit weder Pegel- noch Laufzeitunterschiede. Die Lokalisation findet durch Spektralunterschiede statt, da durch die Form und Beschaffenheit des Kopfes und der Ohren in Abhängigkeit von der Einfallrichtung sowie durch Beugung bzw. Reflexion Klangfarbenunterschiede entstehen. Das bedeutet, dass bestimmte Frequenzbänder je nach Einfallrichtung angehoben bzw. abgesenkt werden. Diese Klangfarbenveränderungen werden nicht bewusst wahrgenommen, helfen aber dem Gehör bei der Lokalisation. Das Gehör wertet die richtungsabhängigen Maxima aus und bestimmt daraus die Richtung in der Medianebene durch den Vergleich mit gespeicherten Reizmustern. Liegen allerdings keine vergleichbaren Mus-

ter im Gehirn vor, kommt es zu Fehlortungen wie z.B. der Im-Kopf-Lokalisation (siehe Kapitel 2.6.) oder zu Vorne-Hinten-Vertauschungen. Das Gehirn muss aber nicht nur über Erfahrungen verfügen, mit denen es die Struktur des Signals vergleichen kann; das Signal sollte auch breitbandig sein, denn je breitbandiger ein Signal ist, desto besser lässt sich dieses auch lokalisieren. Außerdem erfolgt die Lokalisation sicherer, wenn der Person die Signale bekannt sind. Die Lokalisation in der Medianebene ist ungenauer als die in der Horizontalebene, da die wichtigen Pegel- und Laufzeitdifferenzen fehlen.

2.4. Blauertsche Bänder

Die oben erwähnten richtungsbestimmenden Bänder werden Blauertsche Bänder genannt. Blauert fand heraus, dass beim natürlichen Hören von Schallquellen in der Medianebene abhängig von der Schalleinfallrichtung bestimmte im Pegel angehobene Frequenzbänder für die räumliche Richtungslokalisierung vorn, oben und hinten maßgebend sind. Das Gehör wertet diese Informationen aus und leitet daraus dann die entsprechende Richtung in der Medianebene ab. Man kann also bestimmte hervorgehobene Frequenzbereiche bestimmten Median-Richtungen vorn, oben und unten zuordnen. Wie man der Abbildung 2.3 entnehmen kann, wird das Frequenzband um 1 kHz hinten lokalisiert. Auch Frequenzen um die 12 kHz werden meistens hinten lokalisiert. Die Bereiche um 400 Hz und 4 kHz werden dagegen eher vorne und um 9 kHz eher oben lokalisiert. Diese Frequenzbereiche sind wichtig für das natürliche Hören und somit auch sehr hilfreich im virtuellen Surround, auf das in Abschnitt 3.5.1. näher eingegangen wird.

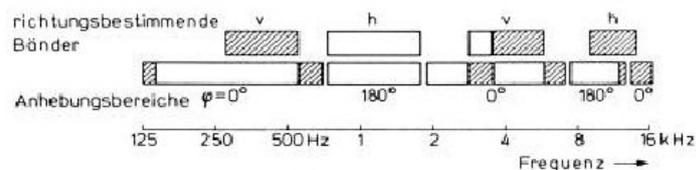


Abbildung 2.3.: Blauertsche Bänder [6]

So ist es möglich, dass ein Signal mit starken Anteilen im Hinten-Bereich ein Hörereignis hinter dem Zuhörer entstehen lässt, obwohl die zugehörige Schallquelle sich vor dem Zuhörer befindet. Im täglichen Leben entsteht allerdings das Hörereignis meistens in der Richtung der Schallquelle, da die Menschen unbewusst ihren Kopf ein wenig hin und her bewegen um die Lokalisation zu verbessern. Dadurch entstehen an den Ohren interaurale Pegel- und Laufzeitdifferenzen, die die Lokalisation erleichtern und die Wirkung der richtungsbestimmenden Bänder größtenteils überdeckt. Außerdem passieren die Schallsignale das äußere Ohr und werden dadurch entsprechend der Schalleinfallrichtung verändert. Diese Anhebungen bzw. Absenkungen im Frequenzband stimmen mit denen der entsprechenden Schalleinfallrichtung in den Blauertschen Bändern überein. Die Frequenzbereiche kann man auch auf die Horizontalebene übertragen, indem man vorne durch präsent und hinten bzw. oben durch diffus ersetzt. Präsent heißt laut Blauert in diesem Fall, dass das Hörereignis präzise zu lokalisieren ist und von den anderen räumlich getrennt erscheint.

2.5. HRTF

Die linearen Verzerrungen im Signal durch das äußere Ohr, den Kopf und den Oberkörper beschreibt die Außenohr-Übertragungsfunktion, kurz HRTF (head related transfer function), d.h. mit ihr wird der Unterschied zwischen dem von der Schallquelle ausgesandten Schall und dem Schall, der tatsächlich in die Gehörgänge gelangt, erfasst. Aufgrund dieser spektralen

Veränderungen erkennt unser Gehör die Richtung des Hörereignisses. Unser Gehirn hat verschiedene Frequenzmuster für unterschiedliche Positionen der Schallquelle, je nach Signal, Entfernung und Richtung, gespeichert, vergleicht die neuen HRTFs beider Ohren mit den vorhandenen Mustern, erkennt sie im besten Fall und kann damit die Richtung der Schallquelle lokalisieren. HRTFs sind wie Fingerabdrücke – ähnlich, aber bei jedem Menschen immer verschieden. Des Weiteren ist für jede Schallquellenposition der Frequenzgang anders (siehe Abbildung 2.4). Hieraus ergeben sich auch gewisse Schwierigkeiten bei der Darstellung von Schallquellen im virtuellen Surround, auf die später noch näher eingegangen wird.

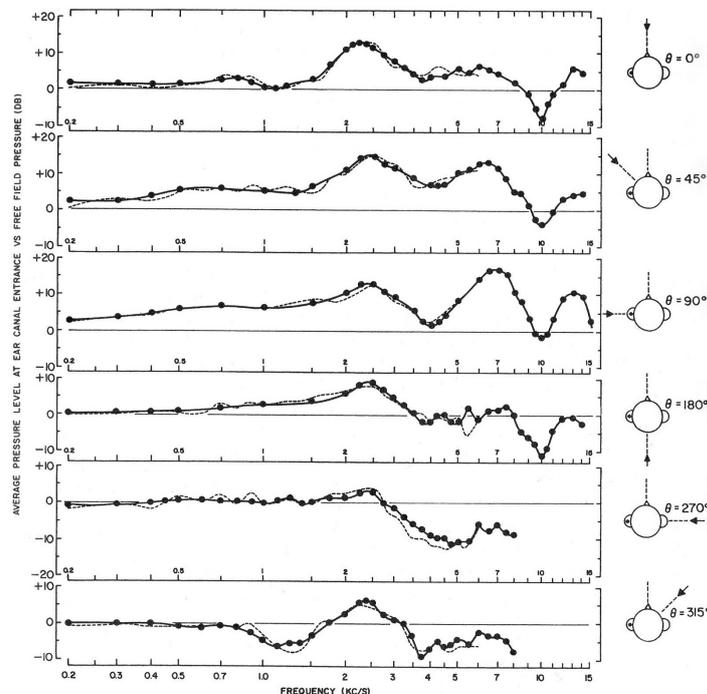


Abbildung 2.4.: Aus je zehn Messungen gemittelte Kurven für unterschiedliche Schalleinfallswinkel: 0°, 45°, 90°, 180°, 270°, 315°. Skalierung der Frequenzachse 200 Hz bis 15 kHz ([16], nach Shaw 1966)

2.6. Lokalisation

Laut Blauert ([6], S.30) ist Lokalisation ein „Zuordnungsgesetz oder -regel (Operator) zwischen dem Ort eines Hörereignisses (z.B. bezüglich Richtung und/oder Entfernung) und einem bestimmten Merkmal oder bestimmten Merkmalen eines Schallereignisses oder eines anderen, mit dem Hörereignis korrelierten Ereignisses. Beispiele: Zuordnung von Hörereignisort und Schallquellenort; Zuordnung von Hörereignisrichtung und interauraler Schalldruckpegeldifferenz“. Diese Definition gilt sowohl für die Richtungszuordnung eines Hörereignisses beim natürlichen Hören als auch für die Zuordnung bei elektroakustischer Wiedergabe. Im umgangssprachlichen Gebrauch wird oft das Wort Ortung für die Richtungsbestimmung des Hörereignisses verwendet. Der terminologisch korrektere Begriff im Zusammenhang mit dem menschlichen Richtungs- und Entfernungshören ist die „Lokalisation“, da „Ortung“ die „optische, elektronische oder akustische Bestimmung des Standorts von Zielen, insbesondere die Bestimmung der Entfernung und der Lage von Objekten [...] durch Auswertung der Sekundärsignale“ [38] meint. Im Gegensatz dazu werden bei der Lokalisation die Informationen des Primärschalls an den Ohren ausgewertet um die Richtung und Entfernung einer Schallquelle zu bestimmen.

Man unterscheidet außerdem zwischen Lokalisation und Lateralisation. Lateralisation bezieht sich ausschließlich auf Kopfhörerdarbietungen. Dabei entsteht das Hörereignis im Kopf, da bei einer Kopfhörer-Wiedergabe die Eigenschaften der natürlichen Richtungslokalisation, die durch die oben beschriebenen Effekte der positionellen und ergonomischen Eigenschaften verursacht werden, entbleiben. Man kann Kopfhörer quasi als zwei Schallquellen begreifen, die keine Entfernung zu den Ohren haben und direkt auf ihnen sitzen. Die Lateralisation beschreibt die seitliche Auslenkung des Hörereignisses auf einer gedachten Geraden, die zwischen beiden Ohren aufgespannt ist. Dafür wurde eine Lateralisationsskala von - 10 bis + 10 eingeführt, wobei bei - 10 sich das Hörereignis am linken Ohr, bei + 10 am rechten Ohr und bei 0 direkt zwischen den beiden Ohren befindet. Der Zuhörer kann mit dieser Skala angeben, wo genau er das Hörereignis im Kopf wahrnimmt. Dagegen bezieht sich Lokalisation auf Schallquellen, die sich außerhalb des Kopfes befinden.

Auch bei der Lokalisation können Hörereignisse im Kopf entstehen, die sogenannte Im-Kopf-Lokalisation. Im-Kopf-Lokalisation findet man vor allem bei der Wiedergabe über Kopfhörer. Das Gehirn vergleicht die eintreffenden Signale auf bekannte interaurale Differenzen und spektrale Strukturen. Sollten für das Signal aber keine entsprechenden Reizmuster im Gehirn gespeichert sein, so dass die ankommenden Reize keiner natürlichen Schallquelle außerhalb des Kopfes zugeordnet werden können bzw. die Reizmuster für das Gehör völlig neuartig sind, kann das Gehör die Signale für die Lokalisation nicht auswerten und das Hörereignis wird nicht außerhalb, sondern innerhalb des Kopfes lokalisiert.

Lokalisationsunschärfe ist laut Blauert ([6], S.30) die „kleinste Änderung eines bestimmten Merkmals oder bestimmter Merkmale des Schallereignisses oder eines anderen, mit dem Hörereignis korrelierten Ereignisses, die gerade zu einer Ortsänderung des Hörereignisses (z.B. bezüglich Richtung und/oder Entfernung) führt. Die Lokalisationsunschärfe ist eine Eigenschaft der Lokalisation. Beispiele: Lokalisationsunschärfe der Hörereignisrichtung bei seitlicher Auslenkung der Schallquelle“. Da aber im Hörversuch (siehe Kapitel 4) die Lokalisationsschärfe untersucht wurde, sprechen wir im Folgenden zum besseren Verständnis von Lokalisationsschärfe.

Wie schon im vorhergehenden Kapitel erwähnt, ist die Lokalisationsschärfe frequenzabhängig. Sie ist hoch bei mittleren und niedrig bei tiefen Frequenzen. Tiefe Frequenzen tragen hingegen zum Räumlichkeitsgefühl bei. Des Weiteren hängt die Lokalisationsschärfe stark vom Einfallswinkel und von der Signalart ab. Ausgehend von der Horizontalebene liegt sie bei frontalem Schalleinfall zwischen 1° und 3° und nimmt bei seitlichem Schalleinfall auf etwa 4° - 5° ab. Je weiter der Schalleinfall von der Vorwärtsrichtung abweicht, desto schlechter ist die Lokalisationsgenauigkeit und desto geringer ist die Lokalisationsschärfe. Am niedrigsten ist sie hinter dem Kopf; hier sind bis zu 20° möglich. Zudem ist von Bedeutung, ob das Signal bekannt ist. In der Medianebene ist die Lokalisation aufgrund der gleichen interauralen Signaldifferenzen recht schwierig. So kann es passieren, dass vorne und hinten als Hörereignisrichtung gelegentlich verwechselt werden (Fehllokalisation). Kleine Kopfbewegungen helfen bei der Lokalisation, da sich dadurch die Pegel- und Laufzeitdifferenzen ändern und das Gehör mehr Informationen für die Auswertung der Hörereignisrichtung bekommt. Das Schallereignis darf dafür nicht kürzer als 200 ms sein. In die Lokalisation spielen noch andere Faktoren mit rein, wie z.B. die emotionale und kognitive Situation des Zuhörers. Visuelle Reize können sogar in manchen Fällen die akustischen Reize dominieren.

3. Räumliches Hören bei elektroakustischer Wiedergabe und technische Lösungen

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Grundlagen des räumlichen Hörens in Bezug auf natürliche Schallquellen in natürlichen Umgebungen erklärt. Die Grundlagen dienen zum Verständnis für das folgende Kapitel, in dem das räumliche Hören bei elektroakustischer Wiedergabe in geschlossenen Räumen über Kopfhörer und Lautsprecher bei zwei und mehr Schallquellen näher betrachtet wird, beginnend mit der Stereo-Anordnung bis hin zum realen und virtuellen Surround.

3.1. Stereo

In der Stereo-Anordnung bilden die zwei Lautsprecher mit dem Hörer ein gleichseitiges Dreieck (siehe Abbildung 3.1). Wenn zwei Lautsprecher exakt dasselbe Schallsignal gleichzeitig abstrahlen, entsteht das Hörereignis zwischen den Lautsprechern; der Hörer lokalisiert also den Schall aus einem fiktiven Lautsprecher zwischen den beiden wirklich existierenden Lautsprechern. Da das Hörereignis nicht von einer realen Schallquelle wiedergegeben wird, spricht man von einer sogenannten Phantomschallquelle. Diese kommt beim natürlichen Hören nicht vor, da das Hörereignis mit dem Schallereignis normalerweise übereinstimmt; jedoch lässt es sich von dem Signal eines einzelnen Lautsprechers nicht unterscheiden.

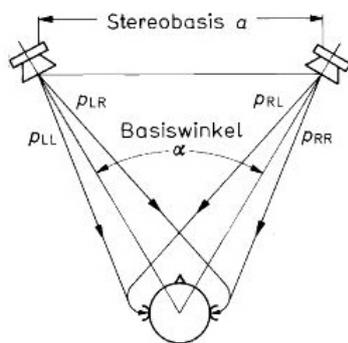


Abbildung 3.1.: zwei Lautsprecher in Stereo-Standardaufstellung [6]

Da das Schallereignis von zwei Punkten und nicht nur von einem ausgeht, überlagern sich die Signale der beiden Lautsprecher und jedes Ohr bekommt einen bestimmten Anteil der beiden Schallsignale, woraus dann die Lokalisation des Hörereignisses entsteht (zu sehen an den Pfeilen in der Abbildung 3.1). Der Hörer nimmt nicht zwei getrennte Schallquellen, sondern eine einzige fiktive Schallquelle wahr. Auf diese Weise erzeugen zwei Schallereignisse ein Hörereignis. Allerdings müssen dafür bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. So darf der Hörer den Sweet Spot nicht verlassen, d.h. er muss innerhalb der Stereohörzone, dem optimalen Abhörbereich, sitzen und die Pegel- und Laufzeitdifferenzen sollten bestimmte Werte nicht überschreiten. Je nach Pegel- und Zeitdifferenz wandert das Hörereignis auf der Basislinie zwischen den beiden Lautsprechern. Dabei können die Differenzen in Abhängigkeit von dem gewählten Aufnahmeverfahren allein oder gleichzeitig auftreten.

Wie bereits erwähnt ist es bei der Stereo-Anordnung der Lautsprecher sehr wichtig, dass sich der Hörer im Sweet Spot, befindet, da ansonsten durch die zusätzlichen Laufzeitdifferenzen Richtungsverzerrungen entstehen. So verlagert sich die Phantomschallquelle dann in die Richtung des Lautsprechers, der sich näher am Hörer befindet. Bei der Surround-Aufstellung verbreitert sich dieser Bereich durch die größere Anzahl der Lautsprecher und die Lokalisationsschärfe verbessert sich (ausführlicher siehe Kapitel 3.5.). Bei seitlichen Phantomschallquellen ist der Sweet Spot von großer Bedeutung. Seitliche Phantomschallquellen sind äußerst instabil und empfindlich bezüglich des Abhörpunktes. Ihre Lokalisation ist verschwommen und instabil. Kleine Veränderungen der Kopfhaltung haben nur eine geringe Auswirkung auf die wahrgenommene Position der Schallquelle. Doch sobald der Hörer den Kopf so weit dreht, dass sich eine Schallquelle vor und eine hinter der Ohrachse befindet oder er den Kopf wegbewegt, verändert sich die Auslenkung der Phantomschallquelle und die Lokalisationsschärfe wird geringer. Somit hat man im Seitenbereich keine ausreichende Richtungsstabilität.

3.1.1. Pegeldifferenzen

Wenn beide Lautsprecher das identische Signal gleichzeitig mit dem gleichen Pegel und ohne Laufzeitdifferenzen abstrahlen, entsteht eine Phantomschallquelle zwischen den beiden Lautsprechern. Je mehr Pegel ein Lautsprecher abstrahlt, desto weiter wandert die Phantomschallquelle aus der Mitte der Basis zum Lautsprecher mit dem höheren Pegel. Ab einer Pegeldifferenz von ca. 15 dB lokalisiert der Hörer die Phantomschallquelle an der Stelle des Lautsprechers mit dem höheren Pegel. Allerdings befindet sich die Phantomschallquelle schon ab einem Pegel von 12 dB so nahe am Lautsprecher, dass es in der Praxis bei dieser Pegeldifferenz zu einer Lokalisation im Lautsprecher führen kann. Größere Pegeldifferenzen als 20 dB ändern den Höreindruck allerdings nicht mehr. Die Phantomschallquelle bleibt dann am Ort des Lautsprechers mit dem höheren Pegel stehen. Im Gegensatz zum natürlichen Hören sind die Pegeldifferenzen bei der Lautsprecher-Wiedergabe in der Stereo-Anordnung relativ unabhängig von der Frequenz und der spektralen Zusammensetzung des Signals.

3.1.2. Laufzeitdifferenzen

Auch durch Laufzeitdifferenzen kann die Phantomschallquelle auf der Basis zwischen den Lautsprechern wandern. Allerdings gibt es auch hier bestimmte Grenzen bei der Lokalisation der Phantomschallquelle zu beachten. Bis zu einer Zeitdifferenz von 0,6 ms bewegt sich die Phantomschallquelle zum früheren Lautsprecher. Bei einem Zeitunterschied zwischen 0,6 ms und 1 ms befindet sich die Phantomschallquelle im früheren Lautsprecher. Ab ca. 1 ms bis etwa 30 ms wirkt das Gesetz der ersten Wellenfront: eine Schallquelle wird stets in die Richtung lokalisiert, aus der die erste Wellenfront den Kopf erreicht (Präzedenzeffekt). Somit wird nur derjenige Lautsprecher als Ort der Schallquelle wahrgenommen, der das Signal zuerst abstrahlt. Dabei kann der Pegel des späteren Signals (bei Sprache) bis zu 10 dB angehoben werden, ohne dass ein Echo wahrgenommen wird. Dieses Phänomen wird als Haas-Effekt bezeichnet. Bei Laufzeitdifferenzen, die über dieser Schwelle liegen, verschmelzen die Signale der Lautsprecher nicht mehr zu einem Hörereignis, sondern man hört nacheinander zwei in die Richtung getrennte Signale und nimmt das zweite Schallsignal als Echo wahr. Die Echoschwelle ist stark abhängig von der Signalstruktur, vom Pegel des Sekundärschalls und von der Akustik des Wiedergaberaums (Näheres zu den Reflexionen siehe Kapitel 3.2).

3.1.3. Zusammenspiel von Pegel- und Laufzeitdifferenzen

Pegel- und Laufzeitdifferenzen unterscheiden sich in Bezug auf die Lokalisationsschärfe bei größeren Signaldifferenzen; bei kleineren sind sie gleichwertig. Bei wachsender Pegeldifferenz

nimmt die Lokalisationsschärfe zu und bei wachsender Zeitdifferenz nimmt sie ab. Laufzeitdifferenzen können also die Richtungsstabilität der Phantomschallquelle beeinträchtigen. Wenn beide Differenzen gleichzeitig und gleichsinnig zusammenwirken, ist die seitliche Auslenkung der Phantomschallquelle größer als nur aufgrund von Pegel- oder Laufzeitdifferenzen allein. Wenn sie gegensinnig wirken, heben sie sich gegenseitig auf bzw. ist die seitliche Auslenkung geringer und die Lokalisationsschärfe nimmt stark ab.

3.2. Geschlossene Räume

Nicht nur der Direktschall, sondern auch die ersten Reflexionen von den Wänden, der Decke und dem Boden sind für das Hörereignis von Bedeutung. Im freien Schallfeld sind jene sehr gering, da nur der Boden die Schallwellen reflektiert. In geschlossenen Räumen ist das anders. Deshalb spielen hier die Verzögerung, Stärke und Einfallsrichtung der ersten Reflexionen eine wichtige Rolle. Sie haben zwar einen geringeren Schalldruckpegel als der Direktschall, aber sie bestimmen den Klangeindruck. Sie liefern Informationen über die Raumgröße, die Raumgeometrie, den Klang und die Entfernung der Schallquelle sowie die Beschaffenheit der Reflexionsflächen. Alle Reflexionen, solange die Verzögerung dieser kleiner ist als die Echschwelle, erhöhen die Lautstärke des Direktschalls und somit die Deutlichkeit. Daher hilft der Präzedenzeffekt bei der Orientierung. Die Laufzeitdifferenzen der Reflexionen bestimmen die empfundene Raumgröße.

3.3. Summenlokalisierung und Assoziationsmodell

Zur Erklärung der Phänomene des räumlichen Hörens bei elektroakustischer Wiedergabe gibt es zwei verschiedene Modelle, die u.a. die Lokalisation der Phantomschallquelle erklären. Allerdings sind beide Theorien noch nicht vollständig nachgewiesen.

Die Schallwellen der Lautsprecher überlagern sich. Ausgehend von dem Modell der Summenlokalisierung wird die Phantomschallquelle als Ersatzschallquelle, d.h. wie eine reale Schallquelle am gleichen Ort wie die Phantomschallquelle, angesehen. Des Weiteren wird angenommen, dass in deren Schallfeld am Hörort die gleichen Ohrsignalmerkmale erzeugt werden wie im überlagerten Schallfeld. Das Gehör kann die Komponenten der entstehenden Summensignale nicht trennen. Somit sind bei der Lokalisation die Signale an beiden Ohren sowohl bei der Phantomschallquelle als auch bei der Ersatzschallquelle gleichwertig, obwohl sie nicht identisch sind ([6], [10]). Die Summenlokalisierung erklärt einige Phänomene der Lokalisation von Phantomschallquellen, allerdings nur im Bezug auf die Lautsprecher-Wiedergabe und nur in bestimmten Bereichen. Sie ist als Theorie nur eingeschränkt anwendbar.

Deswegen hat Günther Theile 1980 das Assoziationsmodell der Wahrnehmung (siehe Abbildung 3.2) vorgestellt, mit dem die wichtigsten Phänomene des räumlichen Hörens sowohl bei Lautsprecher- als auch bei Kopfhörerwiedergabe sowie beim natürlichen Hören erklärt werden ([45], [46]). Im Unterschied zur Summenlokalisierung geht das Assoziationsmodell davon aus, dass die Phantomschallquelle keine Ersatzschallquelle ist, sondern die beiden Lautsprechersignale gemeinsam für die Lokalisation der Phantomschallquelle zuständig sind. Das Assoziationsmodell basiert auf zwei Hypothesen.

Die erste Hypothese besagt, dass die Wahrnehmung des Ortes und der Klanggestalt eines Hörereignisses stets auf den Vergleich mit gespeicherten Mustern erfolgt. Ergo wird das eintreffende akustische Muster des aktuellen Reizes mit erlernten Reizmustern verglichen, selbst dann, wenn nur Teile des gespeicherten Musters im akustischen Muster enthalten sind. Die Reizmuster sind infolge der Erfahrung bestimmten Hörereignis-Orten zugeordnet. Gemäß der zweiten Hypothese resultiert die räumliche Wahrnehmung aus zwei unterschiedlichen Verarbeitungsprozessen – der Ortsassoziationsstufe und der Gestaltassoziationsstufe. In der ersten Stufe werden

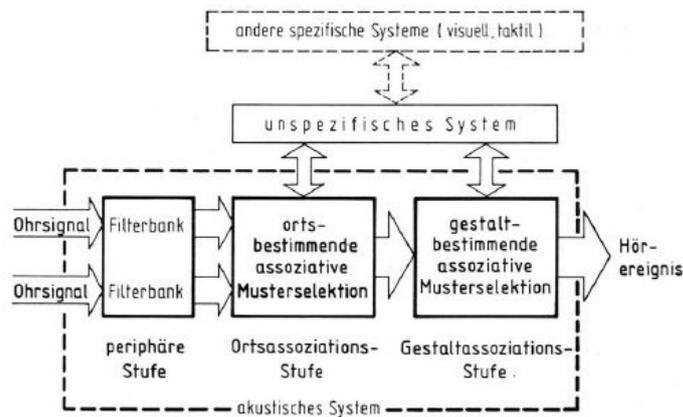


Abbildung 3.2.: Assoziationsmodell nach Theile [45]

die Lautsprechersignale mit Hilfe der Hörerfahrungen je nach Schalleinfallrichtung im Gehör entschlüsselt und die spektralen Veränderungen, die aufgrund der HRTFs auftreten, eliminiert. In der zweiten Stufe werden die eigenschaftlichen Merkmale des Hörereignisses mit Ausnahme der räumlichen Merkmale bestimmt. Die Reize verschmelzen und bestimmen gemeinsam die Eigenschaften des Hörereignisses. Wenn der Reiz in der ortsbestimmenden Stufe sich keinem erlernten Reizmuster zuordnen lässt, kommt es zur Im-Kopf-Lokalisation. Der Hörereignisort lässt sich aber in gewissem Maße unabhängig von dem Schallquellenort durch Assoziationslenkung beeinflussen, z.B. durch begleitende optische Reize. Diese zusätzlichen optischen Informationen können eine Im-Kopf-Lokalisation verhindern. Die zuvor erklärten Grundlagen der Lokalisation verlieren auch hier nicht ihre Bedeutung: Die Phantomschallquelle in der Horizontalebene hängt von den Laufzeit- und Pegeldifferenzen beider Lautsprechersignale ab und der erste Lokalisationsreiz bzw. derjenige mit dem größeren Pegel dominiert in der Gestaltassoziationsstufe.

3.4. Kopfhörer-Wiedergabe

Nach der eingehenden Erörterung der raumbezüglichen Stereophonie in den vorherigen Kapiteln, wenden wir uns nun der kopfbezüglichen Stereophonie, also der Wiedergabe über Kopfhörer, zu. Im folgenden Abschnitt werden die Vor- und Nachteile der Kopfhörer-Wiedergabe, die verschiedenen Arbeitsprinzipien der Kopfhörer, der Kunstkopf und die Diffusfeldentzerrung vorgestellt.

3.4.1. Kopfhörer und ihre Vor- und Nachteile

Kopfhörer arbeiten nach dem Druckkammerprinzip. Dementsprechend erzeugen die Membrane des Kopfhörers keine Schallwellen, sondern bilden mit dem Außenohr eine Druckkammer und übertragen den Schall direkt an das Trommelfell. Somit hat das Außenohr keinen Einfluss auf das Signal. Im Gegensatz zur Lautsprecher-Wiedergabe ist bei der Kopfhörer-Wiedergabe jedem Ohr genau ein elektroakustischer Wandler zugeordnet, der nur in sehr geringem Maße Einfluss auf das andere Ohr hat. Man kann daher auch jedem Wandler ein anderes Signal zuspielen. Das nennt man dichotisch. Erhalten beide Ohrhörer das gleiche Signal, spricht man von einer diotischen Kopfhörer-Darbietung und bei monotischer Beschallung erhält nur ein Ohrhörer ein Signal und nicht beide.

Bei Kopfhörern sorgen ebenfalls Pegel- und Laufzeitdifferenzen für eine Auslenkung des Hörereignisses. Kopfhörer kann man wie kleine Lautsprecher betrachten: Sie verfügen über die gleichen elektroakustischen Eigenschaften, aber auch über spezifische Vor- und Nachteile. Von Vorteil

ist, dass die Wiedergabe unabhängig von dem Raum ist, indem man sich aufhält. Diese ortsunabhängige Verwendung ermöglicht den Einsatz für eine größere Höhrerzahl. Man kann immer eine einheitliche Abhörsituation schaffen. Des Weiteren sind Kopfhörer gut für schlechte Wiedergabebedingungen geeignet, da Umgebungsgeräusche bis zu einem gewissen Maße ausgeschaltet sind, und eine Abhörlautstärke entsprechend der Originallautstärke immer möglich ist. Nachteilig ist der schon erwähnte unangenehme Effekt der Im-Kopf-Lokalisation und das Mitwandern des Klangbildes, wenn der Hörer den Kopf dreht. Außerdem kann das Tragen des Kopfhörers mit der Zeit als lästig empfunden werden. Allerdings kann man die Kopfbezogenheit des Klangbildes durch sogenannte Headtrackingverfahren verhindern und die Im-Kopf-Lokalisation, indem man Kunstkopfaufnahmen verwendet. Auf beides wird später noch näher eingegangen.

3.4.2. Arbeitsprinzipien

Es gibt verschiedene Arbeitsprinzipien. Geschlossene Kopfhörer umschließen das gesamte äußere Ohr und sind in beide Richtungen schallundurchlässig. Sie sind aufgrund der guten Schalldämmung geeignet für laute Umgebungen oder Tonstudios, da hier keine Außengeräusche das Abhören der Aufnahme stören sollen. Sie haben eine bessere Basswiedergabe, weil der Schalldruck nicht nach außen entweichen kann. Allerdings sind sie verhältnismäßig schwer und die Wärmeentwicklung unter den Ohrmuscheln kann dazu führen, dass die Ohren heiß werden und anfangen zu schwitzen. Offene Kopfhörer hingegen sind nur wenig abgeschirmt, sodass Schall von außen nach innen durchdringen kann und vice versa. Durch den Druckausgleich haben offene Kopfhörer eine hohe Impulstreue und einen besseren räumlichen Klang. Das mögliche Eindringen des Schalls von außerhalb der Kopfhörer kann aber die Arbeit im Tonstudio stören. Sie sind leichter und angenehmer zu tragen und entsprechen eher dem natürlichen Hören. Ein Kompromiss zwischen den beiden Arbeitsweisen bietet der halboffene Kopfhörer. In ihm sind die jeweiligen Vorteile beider Prinzipien vereint. Welche Art von Kopfhörer man am besten verwendet, hängt von der Musik-Art und / oder dem Einsatzort ab. Bei Kopfhörern gelten keine festgelegten Normen, sodass es deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Typen gibt ([4]).

3.4.3. Kunstkopf

Die Im-Kopf-Lokalisation bei der Kopfhörer-Wiedergabe ist ein großes Problem, da der unnatürliche Effekt oft als unangenehm wahrgenommen wird. Verhindert werden kann er durch Verwendung von Kunstkopfaufnahmen. Der Kunstkopf ist die Nachbildung eines durchschnittlichen menschlichen Kopfes, manchmal auch mit dem dazugehörigen Torso (siehe Abbildung 3.3). In den sehr detailgetreu nachgebildeten Ohren sitzen zwei Sondenmikrofone. Der Kunstkopf wird in einem Aufnahmeraum von Lautsprechern beschallt, die Mikrofone nehmen die Signale auf und durch die nachgebildeten Ohren entstehen die gleichen Klangverfärbungen im Signal (durch Pegel-, Laufzeit- und spektrale Unterschiede) wie bei einem Menschen. Die standardisierten HRTFs des Kunstkopfes (jeweils eine für das linke und eine für das rechte Ohr) werden den entsprechenden Kanälen des Signals aufgeprägt. Wenn man dieses Signal über Kopfhörer abspielt und dabei jedem Ohr den entsprechenden Kanal des Signals zukommen lässt, sind die Verfärbungen bereits in dem Signal enthalten, die aufgrund der Nähe der Kopfhörer an den Ohren nicht entstehen können, und somit kommt es zu einer Lokalisation außerhalb des Kopfes.

Allerdings gelten die HRTFs dann nur für den bestimmten Aufnahmeraum und für die aufgenommenen Schalleinfallrichtungen. Dafür werden die Richtungen und Entfernungen bei der Wiedergabe korrekt und überzeugend abgebildet; es entsteht ein sehr guter Eindruck von Räumlichkeit. Der Vorteil ist, dass sich der Hörer bei der Wiedergabe dieser Signale über Kopfhörer fühlt, als würde er sich tatsächlich in diesem Raum an der Stelle des Kunstkopfes befinden. Das virtuelle Hörereignis stimmt mit dem realen des Aufnahmegebietes nahezu perfekt überein.



Abbildung 3.3.: Kunstkopf KU 100 der Firma Neumann [27]

Das Problem bei diesem Verfahren ist, dass der Kopf und die Ohren bei jedem Menschen unterschiedlich beschaffen sind. Somit hat jeder Mensch ein anderes Paar HRTFs. Da bei dem Kunstkopf standardisierte HRTFs verwendet werden, entsprechen die reproduzierten Kunstkopfsignale nur im Idealfall den individuellen Ohrsignalen. Somit kann es zu Schwierigkeiten bei der Lokalisation kommen. Wenn die HRTFs nicht mit denen des Hörers übereinstimmen, können die Richtungen nicht korrekt zugeordnet werden; vor allem frontale Schallquellen werden vielfach hinter oder über dem Kopf lokalisiert (Vorne-Hinten-Vertauschungen). Die Links-Rechts-Lokalisation hingegen erfolgt meistens zuverlässig.

Auch dafür gibt es zum Teil allerdings aufwändige Lösungen. Wie bereits erwähnt, helfen kleine Kopfbewegungen bei der Lokalisation. Wenn man Kopfhörer trägt, nützen diese nichts, da sich die Schallquellen mit der Drehung des Kopfes bewegen und man so keine neuen Informationen erhält. Mit dem sogenannten Headtracking kann das verhindert werden. Dies bringt vor allem Verbesserungen bei der Lokalisation in der Medianebene. Die binauralen Signale werden an die momentane Kopfbewegung des Hörers dynamisch angepasst. Das heißt, die virtuellen Lautsprecher bleiben starr an der gleichen Position der realen Lautsprecher und der Hörer bekommt durch kleine Kopfbewegungen zusätzliche Informationen. Dazu braucht man die entsprechenden HRTFs aus den Schalleinfallrichtungen (praktische Anwendung siehe Abschnitt 3.5.2.). Eine weitere Lösung ist die Individualanpassung der Kopfhörer entsprechend der HRTFs des Hörers. Allerdings gibt es dafür noch keine praxistauglichen Lösungen. Der Kunstkopf erzeugt binaurale Signale. Man kann die aufgenommenen Signale mit den abgespielten Signalen vergleichen, die HRTFs sondieren und sie dann in Form digitaler Filter mit dem Computer durch Faltung mit jedem beliebigen Signal verbinden. So kann man raumbezügliche Aufnahmen in kopfbezügliche konvertieren und alle Schallquellenrichtungen und räumliche Attribute mit nur zwei Kanälen übertragen.

3.4.4. Diffusfeldentzerrung

Ein weiteres Problem zwischen raum- und kopfbezüglichen Stereophonie ist ihre begrenzte Kompatibilität. Wenn man kopfbezügliche Signale über Lautsprecher abspielen will, muss man dafür sorgen, dass wie bei den Kopfhörern jedes Ohr auch nur das für es bestimmte Signal erhält, da die HRTFs als Klangfärbungen wahrgenommen werden. Dies ist sehr schwierig und nur über Lautsprecher mit Crosstalk-Cancelling möglich. Wenn man raumbezügliche Aufnahmen über Kopfhörer wiedergeben will, muss man Kunstkopfaufnahmen verwenden bzw. das Signal mit den entsprechenden HRTFs filtern.

Günther Theile schlägt als „Universalschnittstelle zwischen Aufnahme- und Wiedergabeseite“ ([46], S. 155) eine Diffusfeldentzerrung des Kunstkopfes und des Kopfhörers vor, um Verzerrungen des Frequenzganges entgegenzuwirken und größtmögliche Klangneutralität zu gewährleisten. Klangneutralität meint in diesem Fall keinen ebenen Frequenzgang, sondern einen diffusfeldentzerrten. Man unterscheidet zwischen Freifeld- und Diffusfeldentzerrung. Bei der Freifeldentzerrung wird der Frequenzgang des Kopfhörers bezogen auf eine Schalleinfallrichtung angepasst, meistens für den Direktschall von vorne. Eine richtungsspezifische Entzerrung der Kopfhörer ist aber wenig sinnvoll, da es bei der Kopfhörer-Wiedergabe keine bevorzugte Schalleinfallrichtung gibt. Man braucht daher einen richtungsneutralen Bezug, der von dem Diffusfeld geliefert wird. Das Diffusfeld ist der Bereich, an dem die Reflektionen lauter sind als der Direktschall, und ist im Gegensatz zum Freifeld durch gleichmäßigen Schalleinfall aus allen Richtungen gekennzeichnet. Das Mittel über alle Schalleinfallrichtungen ist ungefärbt.

3.5. Surround

Die bisherigen Kapitel haben sich mit der stereofonen Wiedergabe beschäftigt. Im folgenden Kapitel werden deshalb die Anordnung und die Besonderheiten von Surround und der Spezialfall des virtuellen Surround mit seinen technischen Anwendungen erklärt. Surround bildet die Erweiterung von Stereo zur Realisierung eines echten räumlichen Klangerlebnisses. Durch die zusätzlichen zwei Surround-Lautsprecher im seitlichen bzw. hinteren Bereich bekommt man einen wirklichen Eindruck von räumlicher Tiefe. Sie verbessern den Raumeindruck. Die Surround-Anordnung vervollständigt ein zusätzlicher Lautsprecher genau vor dem Hörer mittig auf der Stereobasis – der sogenannte Center. Er verbessert die Richtungsstabilität der Abbildung in der Mitte, da er schärfer zu lokalisieren ist als eine mittige Phantomschallquelle. Alle fünf Lautsprecher sind auf Ohrenhöhe und kreisförmig angeordnet, sodass sie alle den gleichen Abstand zum Sweet Spot haben, in dem sich der Hörer befindet. Der vordere linke und rechte Lautsprecher befindet sich auf $+30^\circ$ bzw. -30° , die hinteren Surround-Lautsprecher zwischen $\pm 110^\circ$ und $\pm 130^\circ$ (ITU-R BS.775-1; siehe Abbildung 3.4). Der optionale LFE-Lautsprecher (Low Frequency Effect) für tieffrequente Effekte wird bei der Wiedergabe von Sprache und Musik nicht verwendet.

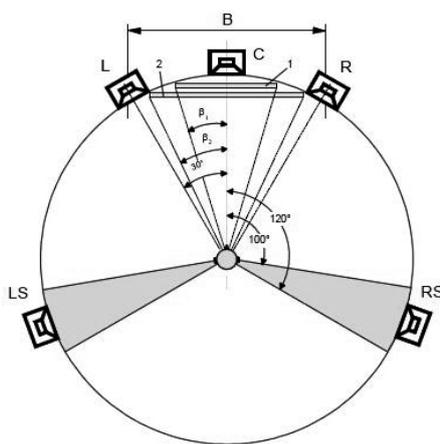


Abbildung 3.4.: Surround-Anordnung nach ITU-R BS.775-1 [20]

Durch die zusätzlichen Lautsprecher wird die Hörzone verbreitert und die stereofone Qualität der seitlichen Abbildung von Phantomschallquellen verbessert. Es entsteht ein Eindruck der Umhüllung: Der Hörer hat das Gefühl, räumlich von Schall umschlossen und mitten im akustischen Geschehen zu sein. „Alle Effekte des räumlichen Hörens, die bei zwei Schallquellen zu beobachten sind, können bei mehreren Schallquellen, gegebenenfalls modifiziert, ebenfalls auf-

treten.“ ([6], S. 220). Somit gelten die erklärten Grundlagen von der Wiedergabe über Stereo, wie z.B. das Entstehen der Phantomschallquelle durch Laufzeit- und Pegeldifferenzen, auch für die Beschallung mit mehreren Lautsprechern und somit auch für Surround.

3.5.1. Virtuelles Surround

Ein besonderer Fall der Surround-Technik ist das virtuelle Surround. Die virtuelle fünfkanalige Wiedergabe simuliert die reale 5.1-Beschallung. Es erzeugt also virtuelle Schallquellen an der Position der realen Lautsprecher im Surround. Virtuelles Surround ist ein weit gefasster Begriff. Er umfasst alles, was mit virtuellen Schallquellen zu tun hat. Dazu zählen sowohl Systeme, die mit zwei Lautsprechern durch Reflexionen 5.1 erzeugen, als auch verschiedene Kopfhörer-Surround-Systeme, die mittels zwei Schallquellen Surround simulieren. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich nur auf den letzteren Fall.

Dazu wird jedem der fünf Kanäle, die durch Kunstkopfstereofonie gewonnenen interauralen der beiden Ohren, die zu der entsprechenden Schalleinfallrichtung gehören, beaufschlagt. Anschließend werden die fünf linken und die fünf rechten bearbeiteten Signale zu einem stereofonen Gesamtsignal zusammengefasst und über Kopfhörer abgespielt. Dafür müssen für alle benötigten Schalleinfallrichtungen die mit dem Kunstkopf gemessenen HRTFs vorhanden sein; meistens werden sie in Datenbanken gespeichert, auf die der Prozessor dann zugreifen und die benötigten HRTFs verwenden kann. Dadurch kann man virtuell jede beliebige Position des virtuellen Lautsprechers simulieren.

Um die „richtige“ Lokalisation zu unterstützen, kann man auf die Blauertschen Bänder zurückgreifen. Sie sind zwar in der HRTF schon integriert, aber trotzdem kann man die entsprechenden Frequenzbereiche je nach benötigter Schalleinfallrichtung zusätzlich verstärken, um sicher zu gehen, dass die erwünschte Wahrnehmung erzielt wird. Wenn man im Frequenzband des Hörereignisses Frequenzen im Bereich von den Vorne-Bändern anhebt, führt dies zu einem präzise lokalisierten Hörereignis. Da Schallquellen hinter dem Hörer oft schwer zu lokalisieren sind, unterstützt eine Anhebung der Hinten-Bänder die Lokalisation. Dabei muss beachtet werden, dass die veränderte Klangfarbe nicht als Klangverfälschungen in Erscheinung tritt und die Wiedergabe unnatürlich klingt. Jetzt kann für jede Schalleinfallrichtung die virtuelle Schallquelle simuliert werden. Wenn man bei den Kunstkopf-Aufnahmen nun noch den Kunstkopf dreht, die Signale damit aufnimmt und die resultierenden HRTFs berechnet, kann man zusätzlich jede Kopfposition simulieren; mit dem Headtracking-System dann auch dynamisch und in Echtzeit.

Abschließend gilt es die Problematik der Simulation des Raumes zu erörtern. Das dazu dienliche Verfahren wird als Auralisation bezeichnet (dt.: Hörbarmachung). Es ist eine raumakustische Computersimulation, die den Raum und seine geometrischen und akustischen Eigenschaften unter der Verwendung von Simulation von Spiegelschallquellen, Raytracing und der Errechnung des Diffusschalls hörbar macht und so einen virtuellen Raum (nach den Wünschen des Anwenders) schafft. Dazu müssen alle notwendigen Angaben über den Raum eingegeben werden, z.B. Geometrie des Raumes, Beschaffenheit der Begrenzungsflächen, Positionen und Arten der Schallquellen. Daraus werden die Raumimpulsantworten für eine bestimmte Hörerposition berechnet und mit dem Signal gefaltet. Das neu berechnete Raumsignal wird dann mit der HRTF gefaltet. Bei der Wiedergabe des mit der HRTF und der Raumimpulsantwort gefalteten Signals über Kopfhörer fühlt sich der Hörer, als würde er wirklich in dem eingestellten Raum sitzen. Dazu muss das Signal jedoch in einem reflektionsarmen Raum aufgenommen worden sein, da sonst der Hall des Aufnahme Raumes noch hinzukommt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass beliebige, auch bewegte Schallquellenpositionen, realisiert werden können.

Abgesehen von den oben beschriebenen modellbasierten Verfahren gibt es auch die datenbasierte Verfahren, wie z.B. das Binaural Room Scanning (BRS). Dabei wird der Raum nicht simuliert, sondern ein real existierender Abhörraum wird ausgemessen. Die so gewonnenen Daten werden

für den virtuellen Raum verwendet. Die binauralen Impulsantworten werden für jeden Lautsprecher und für jede relevante Positionen des Kunstkopfes exakt gemessen und stehen dann wie die HRTFs in einer Datenbank für die spätere Faltung mit dem Signal zur Verfügung. Es entspricht besser der realen Situation (wenn der Hörer an der gleichen Stelle wie der Kunstkopf sitzt), allerdings ist diese Methode an einen existierenden Raum gebunden und es steht nur dieser Raum als virtueller Raum zur Verfügung. Wenn die Aufnahmen in verschiedenen Räumen durchgeführt wurden, kann man zwischen verschiedenen virtuellen Räumen wählen. Bei beiden Verfahren wird ein Headtracker verwendet, um das Mitbewegen der virtuellen Schallquellen und Vorne-Hinten-Vertauschungen zu vermeiden. Zusätzlich muss der Frequenzgang des verwendeten Kopfhörers berücksichtigt werden, da dieser den Frequenzgang des Signals sonst verändert und dadurch Probleme bei der räumlichen Wahrnehmung entstehen können.

3.5.2. Kopfhörer-Surround-Systeme

Im folgenden Abschnitt werden zwei Kopfhörer-Surround-Systeme kurz vorgestellt um dann das Headzone Pro XT HT und seine Technik zu erläutern. Dieses Kopfhörersystem wurde im praktischen Teil dieser Arbeit verwendet. Alle Systeme sind sowohl für Virtual Reality-Anwendungen oder Computerspiele als auch für die Verwendung in professioneller Tonstudio-Umgebung entwickelt worden.

3.5.2.1. Binaural Sky

Der Prototyp des Binaural Sky-Systems (BRS) wurde 2005 am IRT (Institut für Rundfunktechnik) von Günther Theile, Helmut Wittek und Daniel Menzel entwickelt. Es ist ein Lautsprecherring, der über dem Kopf des Hörers befestigt wird und speziell für binaurale Signale einer Kunstkopfaufnahme entwickelt wurde. Dabei werden die Techniken der Wellenfeldsynthese und der dynamischen Kompensation des Übersprechens bei Lautsprecher-Wiedergabe kombiniert. Unabhängig von der Akustik des jeweiligen Abhörraumes kann die Akustik des gewünschten Raumes simuliert werden. Die Basis dazu bildet das BRS. Der Vorteil dieses virtuellen Kopfhörers ist, dass sich keine Lautsprecher im Sichtfeld des Hörers befinden und keine Kopfhörer verwendet werden ([26]).

3.5.2.2. Phönix 5.1

Das zweite System ist Phönix 5.1 von der Firma EMT, das in Zusammenarbeit mit dem IRT München im Jahr 2005 entwickelt, aber nie kommerzialisiert wurde und ebenfalls das BRS verwendet. Allerdings handelt es sich nicht um einen Lautsprecherring, sondern um eine Surround-Wiedergabe mittels Stereo-Kopfhörer. Es wurde für professionelle 5.1-Wiedergabe entwickelt. Ein 5.1-Abhörraum wird akustisch virtuell simuliert, sodass in nicht optimaler Abhörumgebung, wie z.B. in Ü-Wagen, in professioneller Qualität gemischt werden kann. Mittels Headtracking werden die Kopfpositionen korrekt verarbeitet. Dadurch wird eine korrekte Lokalisation unabhängig von der Kopfhaltung ermöglicht ([14]).

3.5.2.3. Headzone PRO XT

Ein ähnliches Funktionsprinzip, aber nicht mit BRS, liegt Headzone Pro XT von der Firma Beyerdynamic (folgend: Headzone) zugrunde (siehe Abbildung 3.5). „Headzone PRO XT ist ein mobiles Kopfhörersystem mit virtueller 5.1-Wiedergabe zum professionellen Abhören [] und beruht auf der Idee, die maßgeblichen Parameter eines idealen Abhörraumes mit einer bestimmten Lautsprecheraufstellung (bis zu 5.1) mit Hilfe eines Kopfhörers so überzeugend und exakt nachzubilden, dass die Illusion dieses Raumes perfekt wird“ ([3], S. 6). Die Audiokanäle des ankommenden Signals werden so bearbeitet, „dass sie im Kopfhörer genauso wahrgenommen

werden wie in einem realen Raum: außerhalb des Kopfes, an festen Positionen und mit einem realistischen Klangeindruck“ ([3], S. 7).



Abbildung 3.5.: Links: Headzone PRO mit dem Kopfhörer DT 880 Pro HT. Rechts: Headzone PRO XT HT mit dem Kopfhörer DT 770 PRO HT [2]

Die von Headzone verwendeten HRTFs entstanden in Zusammenarbeit mit einer externen Firma. Dazu wurden verschiedene Probanden vermessen. Die daraus entstandenen HRTF-Sätze wurden wiederum an verschiedenen Probanden getestet. Anhand des Satzes von den ermittelten HRTFs, der bei den meisten Probanden funktionierte, wurde ein Kunstkopf gefertigt. Bei den Messungen wurde der Kunstkopf gradweise gedreht, sodass die HRTFs für jeden Grad gemessen und abgespeichert wurden und Headzone bei der Wiedergabe in Echtzeit darauf zugreifen kann.

Den Raum mitsamt den Lautsprechern kann der Anwender mit Hilfe der mitgelieferten Software beliebig einstellen. Man kann die Lautsprecher auf dem ITU-Kreis positionieren, anhand von drei Reglern den gewünschten Raum einstellen und den verwendeten Kopfhörer auswählen. Da Headzone ein Komplettpaket bestehend aus Signalprozessor und dem dazugehörigen Kopfhörer ist, sind die Parameter auf den Frequenzgang des jeweiligen Kopfhörers genau abgestimmt. Zur Wahl werden zwei Kopfhörer angeboten: Der halboffene DT 880 Pro HT und der geschlossene DT 770 Pro HT (HT steht für Headtracking-Funktion).

Die virtuellen Lautsprecher bestehen aus den vorderen linken und rechten Lautsprecher, dem Center und dem hinteren linken und rechten Surround-Lautsprecher. Der LFE-Lautsprecher ist in die Surround-Verarbeitung nicht integriert, da er nur Frequenzen im Tieftonbereich, also unter 120 Hz, wiedergibt und diese zur Lokalisation der Schallquellen nicht beitragen. Da jeder Hörer seinen perfekten Abhörraum unterschiedlich definiert, ist der virtuelle Abhörraum den Wünschen entsprechend einstellbar. Der Benutzer kann mittels der drei Regler seinen gewünschten Raum einstellen. Als Basis für den virtuellen Headzone-Regieraum dienen die Eigenschaften eines guten Referenz-Abhörraums ([3], S 8):

- Hallzeit 200-400 ms
- eine definierte Raumgeometrie
- geringes Niveau an Hintergrundgeräuschen
- keine starken Reflexionen, die den Klang verfärben könnten
- eine sehr diffuse Hallfahne

Headzone arbeitet für die Raumsimulation mit einem modellbasierten Verfahren, der Binaural Environment Modelling Technologie. Diese simuliert alle Effekte, die bei Lautsprecher-Wiedergabe auch auftreten, wie z.B. Pegel-, Laufzeit- und spektrale Unterschiede, das Verhältnis zwischen Direkt- und Diffusschall sowie typische Muster früher Reflexionen im Raum. Mittels Headtracking wird die natürliche Hörweise auch im Kopfhörer realisiert. Die für die Auralisation benötigten

Angaben werden consumerfreundlich in drei Schieberegler abgefragt: Raumgröße (Roomsize), Abstand zwischen den virtuellen Lautsprechern und dem Hörer (Distance) und die Eigenschaften des Regieraumes, den Raumeindruck (Ambience). Die einstellbaren Parameter beinhalten alle Effekte, die in einem realen Raum das Klangbild beeinflussen und sind funktional miteinander verkoppelt. Der Ambience-Regler sollte daher nicht auf 0 stehen. In diesem Fall wird kein Hall simuliert, was einen unrealistischen Klang erzeugt, weil Hall in der natürlichen Umgebung immer auftritt. Außerdem verbessert Hall die Lokalisation. Headzone geht von einem viereckigen Raum aus und berechnet anhand der Raumangaben und dem trockenen Signal alle Reflexionen. Die Schieberegler sind auf einer Skala zwischen 0 und 100 regelbar. Dabei handelt es sich um Prozentangaben. Es werden absichtlich Werte ohne konkreten Bezug zu tatsächlichen Maßeinheiten angegeben, damit der Anwender seinen persönlichen virtuellen Regieraum nach seinem Gehör einstellt und nicht nach gemessenen Werten. Er soll experimentieren bis er das Gefühl hat, dass die Einstellungen realistisch und angenehm klingen. Die eingestellten virtuellen Abhörräume können gespeichert werden und man kann bei der Wiedergabe zwischen den verschiedenen individuell angepassten Räumen umschalten.

Um die Lokalisation zu erleichtern und die exakte Position der Schallquelle zu ermitteln, drehen Menschen unbewusst leicht ihren Kopf. Bei normaler Kopfhörer-Wiedergabe würden sich die Lautsprecher mitbewegen. Wird aber der Headtracker verwendet, bleiben die virtuellen Lautsprecher fest an ihrem virtuellen Ort. Durch die minimalen Kopfbewegungen erhält der Hörer zusätzliche Rauminformationen. Die werden vor allem bei der Lokalisation in der Medianebene benötigt, da hier keine Pegel- und Laufzeitdifferenzen, sondern nur Richtungsinformationen aus den Reflexionen und dem Frequenzgang vorhanden sind. Bei Signalen aus allen anderen Richtungen stehen mehr Informationen zur Verfügung. Deswegen ist die Lokalisation in der Medianebene so schwierig. Headzone arbeitet nur in der Horizontalebene, aber bei den Schnittstellen mit der Medianebene, also Schalleinfall direkt von vorne oder hinten, tritt dieses Problem auch auf.

Der maximale vertikale Winkel des Headtrackers außerhalb der Mittelachse ist 30° (siehe Abbildung 3.6).

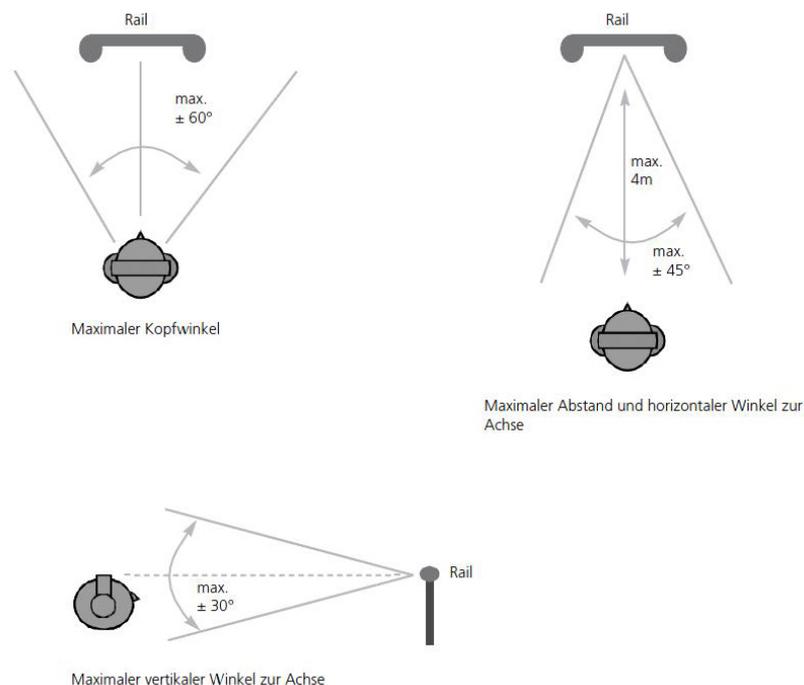


Abbildung 3.6.: Wirkungsbereich des Headtrackers vom Headzone PRO XT HT [3]

Der Headtracker des Headzone-Systems arbeitet mit Ultraschall: Der Sender befindet sich auf dem Kopfhörer und der Empfänger wird direkt vor dem Hörer auf 0° positioniert. Das System registriert dadurch jede Kopfbewegung, passt die Audiowiedergabe entsprechend in Echtzeit an und gewährleistet so ein stabiles Klangbild. Allerdings hat der Headtracker einen festgelegten Arbeitsradius von $\pm 60^\circ$ von der Mittelachse aus gesehen und hat dort eine maximale Abweichung von 1° . In der mitgelieferten Software kann man die genaue Position des Kopfes (Winkel, Entfernung, Mittelachse) gut erkennen. Sobald man sich in den kritischen Bereich zwischen $\pm 60^\circ$ und $\pm 90^\circ$ (in der Software rot gekennzeichnet) bewegt, kann es zu einem Leistungsverlust des Headtracker kommen; dies hängt jedoch von der Entfernung ab. Die maximale Reichweite des Headtracker ist 4 m. Bei kurzen Entfernungen funktioniert der Headtracker auch im kritischen Bereich. Dreht man den Kopf mehr als $\pm 90^\circ$, ist die korrekte Funktion des Headtracker nicht mehr garantiert. Falls man etwas abseits der Mittelachse sitzt, kann man mit der Reset-Taste die Mittelachse des Headtracker neu festlegen. Dabei ist zu beachten, dass sich zwischen dem Ultraschall-Sender und -Empfänger keine Störgegenstände befinden, damit eine ungehinderte Sichtverbindung entsteht und die Ultra-Schallwellen ohne Probleme gesendet und empfangen werden können.

Anhand der Raumeinstellungen und der Kopfausrichtung werden mittels digitaler Signalverarbeitung den Kanälen des Audiosignals die entsprechenden HRTFs und der virtuelle Raumklang aufgeprägt und als Stereo-Signal auf den Kopfhörer gegeben. Im Vordergrund steht dabei die maximale Wiedergabegenauigkeit. Dadurch, dass das System sehr kompakt und transportabel ist, eignet es sich gut für Mischungen, an Orten, die aufgrund ihrer akustischen Eigenschaften dafür ungeeignet sind. Dies macht das System vor allem auch für den Live-Bereich interessant. Der Anwender kann seinen persönlichen Regieraum überall hin mitnehmen. Haupteinsatz des Headzone sind deshalb professionelle Broadcast-Anwendungen, wie z.B. live Surround-Mischen im Ü-Wagen. Das System kam auch kürzlich bei den olympischen Winterspielen in Vancouver zum Einsatz. Es eignet sich außerdem ideal für das Sound-Design von Computerspielen.

4. Hörversuch

Der theoretischen Auseinandersetzung folgt nun die praktische Untersuchung. Kann virtuelles Surround ähnliche Ergebnisse liefern wie reales Surround? Kann es eine gute Alternative zu normalen Kopfhörern sein? Und verbessert der Headtracker die Lokalisation oder kann man auch auf ihn verzichten? Diese Fragen sollen im folgenden Kapitel anhand eines Hörversuches untersucht und beantwortet werden. Zunächst werden die Idee und die Vorbereitungen des Hörversuchs erläutert, dann wird der Versuchsaufbau und die -durchführung erklärt, danach folgt die Auswertung und abschließend werden die Ergebnisse des Hörversuchs vorgestellt.

4.1. Idee

Räumliches Hören sowohl im realen als auch im virtuellen Surround ist ein umfangreiches Thema, welches viel Raum für die verschiedensten Untersuchungen zulässt. Der praktische Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Lokalisation, also der Richtung, in der das Hörereignis entsteht, und wie scharf dieses Hörereignis wahrgenommen wird. Kann man die Ohren wirklich überlisten und das Gehirn austricksen? Als System zur Erzeugung des virtuellen Surround im Hörversuch wurde das Headzone Pro XT HT von der Firma Beyerdynamic ausgewählt. Dessen Funktionsweise wurde in Abschnitt 3.5.2.3. bereits vorgestellt. Der Vergleich zwischen den beiden Wiedergabe-Formen bezieht sich auf die Horizontalebene, da zum einen Headzone nur in dieser Ebene arbeitet und zum anderen die Horizontalebene die Ebene im kopfbezogenen Koordinatensystem ist, in der der Mensch am schärfsten Schallquellen lokalisieren kann. Somit stellt sie die wichtigste Ebene bei der Richtungswahrnehmung (in einer 5.1-Surround-Anordnung) dar. Die Grundidee des Versuchs lässt sich wie folgt darstellen: In dem Hörversuch soll den Probanden immer das gleiche Signal aus unterschiedlichen Richtungen sowohl mit Lautsprechern als auch mit Headzone vorgespielt werden und die Probanden sollen angeben, wo und wie scharf sie es wahrnehmen.

4.2. Vorbereitungen

4.2.1. Signal

Bezüglich des Signals war es wichtig, ein für das menschliche Gehör bekanntes Signal zur Erleichterung der Lokalisation zu verwenden. Was liegt da näher als die menschliche Sprache? Die wesentlichen Komponenten der Sprache liegen in etwa zwischen 100 Hz und 10 kHz. In der Momentaufnahme des Signals (siehe Abbildung 4.1) ist erkennbar, dass das aufgenommene Signal vergleichsweise breitbandig ist. Somit sind alle in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Grundlagen auf den Hörversuch mit diesem Signal anwendbar.

Für die Aufnahme des Signals wurde im Tonstudio ein professioneller männlicher Sprecher mit einem Neumann TLM 170 aufgenommen – ein Großmembranmikrofon, das auf Niere und ohne Vordämpfung eingestellt wurde. Das Mikrofon ist ein typisches Sprechermikrofon. Das Signal wurde mono mit 32 Bit und 44,1 kHz im Wave-Format aufgenommen. Bei der Aufnahme wurde darauf geachtet, dass mit dem Signal so wenig wie möglich Hall aufgenommen wurde, damit dieser später das Signal nicht verfärbt. Die Lokalisation hängt stark vom Signal ab. Da der Text des Sprechers im Hörversuch die Probanden nicht ablenken sollte, wurde die lateinische Sprache zu Hilfe genommen. Wichtig war, dass verschiedene Laute im Satz enthalten sind, um

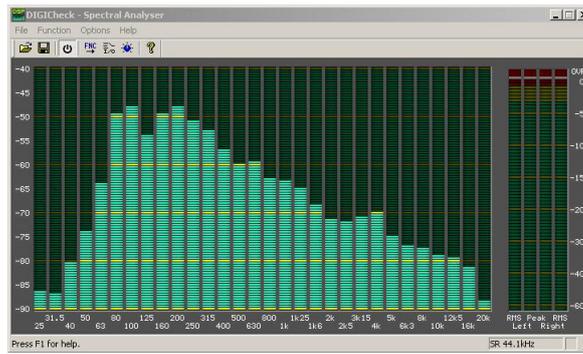


Abbildung 4.1.: Frequenzgang des aufgenommenen Signals (Momentaufnahme)

verschiedene Frequenzbereiche abzudecken und somit eine gute Lokalisation zu ermöglichen: Explosivlaute wie T, K (das C vor einem Vokal wird im Lateinischen wie ein K ausgesprochen) und D, Zischlaute wie das S, stimmhafte Konsonanten wie N, M und R und natürlich die Vokale A, E, I, O und U. Außerdem durfte der gesprochene Text weder zu knapp sein, da man ihn sonst bei der Wiedergabe im Hörversuch nicht lokalisieren kann, noch zu lang, da die Probanden während des Hörversuchs sonst nicht spontan antworten, sondern anfangen nachzudenken. Der folgende Satz vereint alle geschilderten Ansprüche und wurde deshalb für den Hörversuch verwendet:

Nam quod in iuventus non discitur, in matura aetate nescitur [Cassiodor] – Was man in der Jugend nicht lernt, lernt man im Alter niemals. (Heute: Was Hänchen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr.)

Das aufgenommene Signal hat eine Dauer von 5,8 s.

4.2.2. Fragebogen

Nachfolgend musste die Session in dem Audio-Programm Cubase und der Fragebogen für den Hörversuch vorbereitet werden. Das Signal sollte aus verschiedenen Richtungen des Surround-Kreises erklingen. Da Richtung und Schärfe von Interesse waren und nicht Entfernung oder Beschaffenheit des Signals, wurden die Schallereignisse nur auf der Kreislinie positioniert, die die Lautsprecher bilden, und nicht im ganzen Raum verteilt.

Wenn man den Kreis später in der Auswertung vertikal halbiert und an dieser Achse spiegelt, kann die Anzahl der Ergebnisse verdoppelt werden. Der Kreis wurde in 5°-Schritte unterteilt, wobei die Gradschritte keine Gradbezeichnung bekamen, sondern von 1 bis 72 durchnummeriert wurden (siehe Abbildung 4.2). Im Kreis wurden zusätzlich zur besseren Orientierung die Lautsprecher auf den Positionen 0°, +/- 30° und +/- 120° gekennzeichnet. In der Mitte des Kreises befand sich ein kleiner Kreis, der den Kopf des Probanden darstellen sollte und für das Eintragen einer eventuellen vorkommenden Im-Kopf-Lokalisation vorgesehen war. Für jedes Schallereignis zwischen 0° und 180° wurde per Münzwurf entschieden, ob es auf der linken oder auf der rechten Seite abgespielt wird. Dementsprechend wurden die Signale mit dem Surround-Panner in Cubase an die entsprechende Stelle positioniert und die Session so eingerichtet, dass die Signale mit einer Pause zwischen den einzelnen Signalen hintereinander abgespielt werden. Bei der Rasterung der Schallereignisse im Surround-Panner wurde darauf geachtet, dass immer nur zwei Lautsprecher an der Erzeugung des Schallereignisses beteiligt und die Pegeldifferenzen der beiden Schallquellen auf einem halben Grad genau eingestellt sind.

Die Probanden sollten aber nicht nur die Richtung notieren, sondern auch die Schärfe, mit der sie das Hörereignis bestimmen können. Im Gegensatz zur Definition der Lokalisationsunschärfe

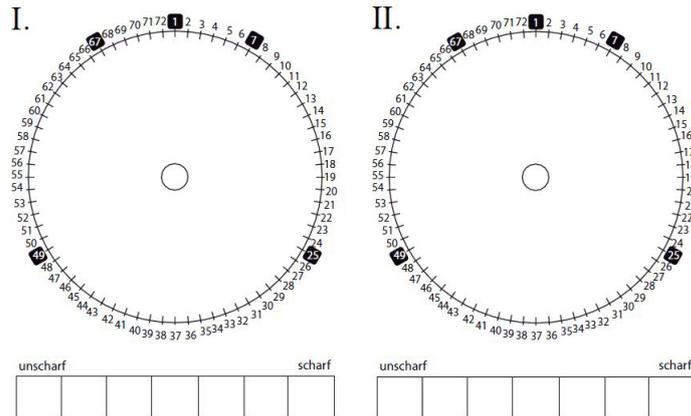


Abbildung 4.2.: Fragebogen

von Blauert ist in dieser Arbeit mit der Lokalisationsschärfe die Ausdehnung des Hörereignisses gemeint. Für die Einschätzung der Schärfe wurde eine siebenstufige Skala von unscharf bis scharf verwendet, in die die Probanden das Hörereignis einordnen sollten. Da Unschärfe immer eine subjektive Empfindung ist, wurden zu Beginn des Versuchs drei Schallereignisse von Realschallquellen vorgespielt, um zumindest das Extrem „scharf“ der Skala dem Probanden vorzustellen. Da der Proband nur ein Extrem der Skala kannte, musste er erst lernen, was für ihn das andere Extrem bedeutet; die Abgrenzungen nach unten musste jeder für sich selbst bestimmen. Durch die Vielzahl der Schallereignisse wurden aber die anfänglichen „Fehler“ im ersten Kreis, um die Skala für sich selber richtig einzuordnen, entkräftet. Bei der Skala wurde auf eine Bezeichnung der Stufen verzichtet; lediglich die Extreme wurden durch die zwei gegensätzlichen Begriffe „scharf“ und „unscharf“ gekennzeichnet. Eine ungeradzahlige Ratingskala wurde gewählt, weil diese eine neutrale Mittelkategorie enthält und bei unsicheren Urteilen das Ausweichen auf diese Neutralkategorie erleichtert.

Auf dem Fragebogen waren zwölf Kreise mit zugehöriger Schärfe-Skala abgebildet. In jedem Kreis sollten die Probanden zu zehn Schallereignissen die Hörereignisse mit der entsprechenden Richtung und Lokalisationsschärfe eintragen. Zu jedem neuen Kreis gab es eine neue Schärfe-Skala. Dadurch verbesserte sich das Urteilsverhalten der Probanden. Den zehn Schallereignissen pro Kreis und Skala wurden Buchstaben von A bis J zugeordnet, welche vor jeder Wiedergabe eines Signals von der Versuchsleiterin angesagt wurden. Die Probanden mussten entsprechend ihrer Wahrnehmung den dem Signal zugehörigen Buchstaben an die Stelle im Kreis und in die Schärfe-Skala eintragen.

4.2.3. Probanden

Die Probanden sollten aus unterschiedlichen Berufsgruppen kommen, nicht nur Studenten sein und freiwillig am Hörversuch teilnehmen. Es wurden einige Professoren und Mitarbeiter der Hochschule der Medien, Studenten der gleichen Studienrichtung der Autorin oder mit Medienaffinität sowie Freunde und Bekannte aus dem Umkreis von Stuttgart mit einer persönlichen E-Mail eingeladen. In den E-Mails wurde das Untersuchungsvorhaben grob erläutert, die zur Verfügung stehenden Termine und der Zeitrahmen mitgeteilt. Der Text war immer gleich. Es variierte nur die persönliche Anrede. Zusätzlich unterstützten einige Professoren den Hörversuch, indem sie ihren Studenten die Teilnahme daran empfahlen. Damit die Probanden ihren Termin

nicht vergaßen, wurde jeder persönlich einen Tag vorher per E-Mail an den genauen Termin erinnert. Ziel war es zwischen 40 und 50 Probanden zu gewinnen, da ab ca. 30 Probanden eine statistische Sicherheit gewährleistet werden kann. 44 Probanden nahmen an dem Hörversuch teil. Die Intention der Probanden war sehr unterschiedlich. Einige Studenten führen im Laufe ihres Studiums Versuche und Umfragen durch; somit beruht die Teilnahme auf Gegenseitigkeit. Bei vielen Probanden stand das persönliche Interesse im Vordergrund, da der Untersuchungsgegenstand sehr neu, modern und innovativ ist und einige waren einfach nur neugierig.

4.2.4. Vorversuche

Das erste System, mit dem die Vorversuche durchgeführt wurden, war das kleine Headzone Pro. Bei den Vorversuchen an verschiedenen Probanden und der Autorin selbst funktionierte die Vorne-Hinten-Lokalisation nur sehr schlecht. Die Hörereignisse sprangen zwischen vorne und hinten oder wurden genau in der entgegengesetzten Richtung lokalisiert. Das Problem lag an der verwendeten HRTF. Sie war eine Mittelung aus mehreren Köpfen und funktionierte nur bei wenigen Menschen wirklich gut. Deswegen hat Beyerdynamic von einem anderen Institut eine neue, bessere HRTF bestimmen lassen (siehe Abschnitt 3.5.2.3.). Diese war zur damaligen Zeit (Juli 2009) bereits im Headzone Pro XT HT gespeichert, sodass für die weiteren Versuche dieses Gerät verwendet wurde. Die nächsten Vorversuche mit dem neuen Gerät verliefen wesentlich besser.

4.2.5. Headzone-Einrichtung

Das System wurde im AM-Tonstudio der Hochschule der Medien Stuttgart installiert und dem realen Raum angepasst. Das Tonstudio wurde als Versuchsraum gewählt, da es dem ITU-Surround-Setup entspricht. Das Ziel war, den virtuellen Raum an den realen Raum anzugleichen. Dazu wurden zunächst die realen Lautsprecher mit einem Schallpegel-Messgerät vermessen, damit der Schall von allen Lautsprechern gleichmäßig auf die Hörzone trifft. Um den virtuellen Raum einzustellen wurde ein Teil eines bekannten Musikstücks verwendet, welches abwechselnd zwischen Lautsprecher- und Kopfhörer-Wiedergabe abgespielt wurde, um die Räume miteinander zu vergleichen. Im A-B-Vergleich wurde so der virtuelle Raum mittels der drei Regler Roomsize, Distance und Ambience im Software Control Center von Headzone entsprechend der Akustik des realen Raumes eingerichtet, bis sie so genau wie möglich übereinstimmten. Dazu schaut man während der Kopfhörer-Wiedergabe den realen Lautsprecher an, bewegt den virtuellen Lautsprecher in die richtige Richtung bis er an der Stelle des realen Lautsprecher steht und stellt dann die Parameter so ein, dass man das Gefühl hat, das Signal kommt aus dem realen Lautsprecher. Dieses Prozedere wiederholt sich bei den weiteren vier Lautsprechern. Die Schwierigkeit dabei war die subjektive Wahrnehmung bei der Einstellung durch die drei Regler. Das bestmögliche Ergebnis wurde gewählt und anschließend die Feinheiten mit dem Tonmeister Prof. Oliver Curdt abgestimmt.

4.2.6. Vorbereitungen des Raumes

Damit die Probanden sich wohl fühlen, wurde das Umfeld so angenehm wie möglich gestaltet: gedämpftes Licht, gute Beleuchtung am Sitzplatz und angenehme Raumtemperatur. Um Blickkontakt während des Versuchs zu vermeiden, wurden zwei Bildschirme als Sichtschutz zwischen Versuchsleiterin und Proband gestellt (siehe Abbildung 4.5). Zur besseren Orientierung wurde zwischen den Lautsprechern ein Garn gespannt mit den Nummern der 5°-Schritte wie sie auch auf dem Fragebogen zu finden sind (siehe Abbildung 4.3). Der Center-Lautsprecher bekam eine große rote eins als Blickfang für die Probanden (siehe Abbildung 4.6 auf Seite 32). Auf Vermeiden jeglicher visueller oder anderer Ablenkung wurde geachtet: keine Ausschläge oder Blinken des Pultes, keine Ablenkung durch andere Personen, Handys und Taschen sowie Essen

und Trinken mussten vor dem Regieraum abgestellt werden (siehe Abbildung 4.4). Der Bereich mittlerer Lautstärke entspricht einem Schallpegel von ungefähr 70 - 80 dB. Um ein gutes Hören des Signals zu gewährleisten, wurde eine Abhörlautstärke von 84 dB gewählt. Die Untersuchungsbedingungen (Raum, Beleuchtung, Geräusche, Arbeitsmaterial, Temperatur, äußere Erscheinung der Versuchsleiterin) blieben bei jedem Probanden gleich, damit jeder Proband die gleiche experimentelle Situation erlebte und der Versuch planbar und auch ohne Probleme jederzeit wiederholbar wäre. Der gesamte Untersuchungsablauf wurde an einem Kommilitonen ausprobiert, um alle Ursachen für mögliche Probleme zu beseitigen.



Abbildung 4.3.: vorbereiteter Raum: Tonstudio der Hochschule der Medien



Abbildung 4.4.: Sichtfeld des Probanden während des Versuchs



Abbildung 4.5.: Arbeitsplatz der Versuchsleiterin aus Sicht des Probanden

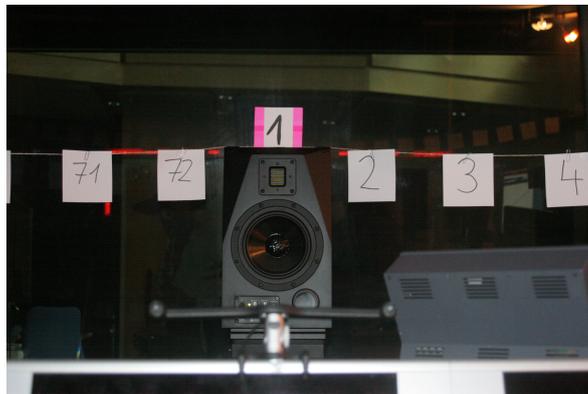


Abbildung 4.6.: Center-Lautsprecher mit Blickfang



Abbildung 4.7.: Kopfhörer DT 880 HT mitUltraschall-Sender



Abbildung 4.8.: Ultraschall-Empfänger



Abbildung 4.9.: Headzone-Basisstation

4.3. Ablauf und Durchführung

Damit die Probanden sich gut konzentrieren konnten und Vertrauen zwischen der Versuchsleiterin und dem Probanden aufgebaut werden konnte, wurde immer nur ein Proband befragt. Jeder Proband wurde persönlich und freundlich begrüßt. Die Versuchsleiterin stellte sich vor und bedankte sich für die Bereitschaft des Probanden. Ein kleiner Smalltalk zu Beginn lockerte die Situation auf und weckte das Interesse. Der Raum wurde vorgestellt und der Proband nahm auf einem Stuhl (fest, nicht drehbar) Platz, der mittig vor dem Mischpult im Sweet Spot aufgestellt war. Um ein entspanntes und lockeres Klima zu schaffen, Vertrauen aufzubauen und den Leistungsdruck von den Probanden zu nehmen, erklärte die Versuchsleiterin persönlich das Anliegen, den Versuchsaufbau und -ablauf und die Instruktionen. Bei der Erklärung des Versuchszieles wurde nur das virtuelle Surround und Fragen, die es in dem Zusammenhang zu klären galt, erläutert. Der Headtracker wurde nicht erwähnt (Blindversuch), da sonst die Versuchsergebnisse beeinträchtigt werden. Wenn die Probanden von dem Headtracker gewusst hätten, hätten sie während des Versuches eventuell darauf geachtet, ob er funktioniert. Ziel war es aber, dass die Probanden ihre Wahrnehmungen spontan und ohne nachzudenken aufschreiben. Die Versuchsleiterin versprach nach Abschluss des Versuchs nähere Erläuterungen zu geben. Dem Probanden wurde versichert, dass alle Angaben, auch die persönlichen, anonym bleiben, nur zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet und die Namen nicht registriert werden. Deswegen wurde jedem Probanden eine fortlaufende Nummer zugeordnet, die er gleich zu Anfang auf den Fragebogen schreiben musste. Um absichtliche Täuschungen und bewusste Fehlreaktionen zu vermeiden und den Probanden zu aufrichtigen Antworten zu bewegen, nahm sich die Versuchsleiterin für jeden Probanden Zeit und machte sich mit ihm vertraut, bevor sie in den Versuchsablauf einstieg.

Als nächstes folgten die Instruktionen, die eine Beschreibung des weiteren Vorgehens sowie der erforderlichen und der unerwünschten Handlungen seitens des Probanden enthielten. Diese waren bei allen Probanden gleich. Nachfolgend sind die entsprechenden Instruktionen stichpunktartig aufgelistet:

- vor dem Versuch im Raum und auf dem Papier orientieren; der Kreis auf dem Fragebogen entspricht dem Lautsprecherkreis im Raum
- während des Versuchs aufrecht sitzen und nach vorne auf die große rote 1 schauen und nicht in die Richtung, aus der der Schall kommt.
- untersucht werden die Lokalisation und die Schärfe der Lokalisation
- kleine Kopfbewegungen sind erlaubt (man kann sie nicht verbieten, da sie unbewusst stattfinden und bei der Lokalisation helfen); große Kopfbewegungen zu den Lautsprechern hin sind aber untersagt
- auf dem Fragebogen sind Kreise mit Nummern (5°-Einteilung) und eingezeichneten Lautsprechern sowie siebenstufige Schärfe-Skalen zu sehen
- es handelt sich um einen dreigeteilten Test (ein Teil über Lautsprecher und zwei über Kopfhörer) mit vorgegebenen Zeitfenster: in jeden Kreis und jede Skala des Fragebogens den Buchstaben A - J notieren; der zum Signal gehörige Buchstabe wird vor jedem Signal angesagt; das sind 10 Buchstaben pro Kreis und Skala und insgesamt 12 Kreise mit Skala
- die Versuchsleiterin sagt den jeweiligen Teil des Versuchs an und beschreibt, was darin zu tun ist
- das jeweilige Signal wird einmal vorgespielt; auf konkreten Wunsch während des Versuchs werden einzelne wiederholt

- wichtig: Ohne nachzudenken, intuitiv, spontan und so schnell wie möglich antworten; es gibt kein richtig oder falsch
- entscheidend ist die unmittelbare Empfindung, der erste subjektive Eindruck
- am Besten das Gehörte sofort niederschreiben; wenn es leichter fällt, sich zu konzentrieren, die Augen beim Hören schließen; das Visuelle unbeachtet lassen
- zwar kein Blickkontakt mit der Versuchsleiterin, aber sie ist jederzeit ansprechbar
- Bescheid sagen, wenn Pause, Fragen oder nochmal vorspielen; ansonsten nicht reden
- zu Beginn gibt es drei Beispiele zur Eingewöhnung; diese Beispiele sind „scharf“
- Unschärfe-Empfinden entwickelt sich erst; es ist in Ordnung, wenn man beim ersten Kreis sich erst einmal eine Einteilung im Kopf schafft, damit man die folgenden Signale richtig einordnen kann
- die Reihenfolge der Schallereignisse ist vom Computer per Zufall generiert
- es kann sein, dass zwei verschiedenen Reize wahrgenommen werden oder die Wahrnehmung springt
- Bemerkungen dazu, Im-Kopf-Lokalisation oder Mehrfach-Lokalisation einfach auf den Fragebogen schreiben.

Nach den Instruktionen wurden die persönlichen Angaben abgefragt. Dabei waren wichtig: das Alter, das Geschlecht, der Beruf und, ob der Proband schon über Erfahrungen im tontechnischen Bereich verfügte. Anschließend wurde die richtige Sitzhaltung und Position des Probanden überprüft, die Versuchsleiterin setzte sich auf ihren Arbeitsplatz, der sich von dem Probanden aus gesehen rechts hinter dem Mischpult befand. Die zwei Monitore waren zur Versuchsleiterin gedreht, damit sie darauf den Versuch (in Cubase) leiten konnte. Blickkontakt zwischen Versuchsleiterin und Probanden wurde durch die Monitore verhindert, damit der Proband ungehindert und unbeobachtet seine Ergebnisse aufschreiben konnte. Die Kommunikation über Gestik und Mimik findet immer statt, auch ungewollt. Das Ziel war deshalb, dass die Versuchsleiterin sich so unsichtbar wie möglich macht, nur die Buchstaben ansagt und für Fragen zur Verfügung steht. Der Proband soll schließlich nur auf den Stimulus reagieren und nicht auf die Versuchsleiterin. Das Verhalten der Versuchsleiterin sollte die Ergebnisse der Untersuchungen nicht beeinflussen. Drei Probestimuli wurden vorgespielt: aus dem rechten, linken und dem Center-Lautsprecher. Dem Probanden wurde danach gesagt, woher die Signale kamen und dass sie theoretisch alle scharf gewesen sein müssten, da sie von Real-Schallquellen, den Lautsprechern, kamen. Die Versuchsleiterin erklärte auch, dass die Problematik mit der Einschätzung der Schärfe bekannt sei und der Proband sich keine Gedanken machen soll, wenn es ihm am Anfang schwer fällt.

Dann begann der Versuch mit der Beurteilung der Schallereignisse durch den Probanden. Es wurden Real-, Phantom- und virtuelle Schallquellen in einem vollautomatischen Test dargeboten. Er war in drei gleiche Teile untergliedert: ein Teil über Lautsprecher (LS), ein Teil über Kopfhörer ohne Headtracker (KH1) und ein Teil über Kopfhörer mit Headtracker (KH2). Jeder Teil bestand aus 39 Stimuli: 36 durch die 5°-Einteilung des Kreises und zusätzlich drei aus dem Center. Die zusätzlichen Stimuli wurden später für die Auswertung gebraucht. Jeder Stimulus eines Teilversuchs bekam eine Nummer von 1 bis 39. Für jeden Tag wurden drei Zufallsfolgen durch ein Computer-Programm generiert: A, B und C jeweils bestehend aus 39 Zahlen. Die Reihenfolge dieser Zufallsfolgen sowie die Reihenfolge der Wiedergabetypen (LS, KH1, KH2) wurden für

jeden Probanden ausgewürfelt. Durch die verschiedenen Variationen wurde eine maximale Unregelmäßigkeit erzielt. Das ist sehr wichtig, denn es verbessert die Qualität des Versuchs, da so die Angaben der Probanden Empfindungen bleiben und keine Erwartungen hervorrufen. Insgesamt hörte jeder Proband somit 118 Stimuli. Jeder Stimulus hatte eine Länge von 5,8 s und zwischen den einzelnen Stimuli war eine Pause von 7,2 s, d.h. der Proband hatte für jeden Stimulus 13 s Zeit um den vorher angesagten Buchstaben in den Kreis und in die Skala zu schreiben. In den Vorversuchen sowie im Testlauf ergab sich eine Pausenzeit zwischen den Stimuli von 7,2 s, die sich als ausreichend und nicht zulange eignete, um den entsprechenden Buchstaben zu notieren. Zwischen den Teilversuchen wurden Übergangsfragen gestellt wie z.B. ob sich der Proband wohl fühlt, er Fragen hat oder eine Pause braucht, ob der Versuch zu langsam oder zu schnell ist. Nach dem Hörversuch wurden die Probanden über die Problematik mit dem Headtracker aufgeklärt und konnten ein kurzes Feedback zum Versuch abgeben. Der gesamte Versuch dauerte im Durchschnitt 36 Minuten pro Proband: sieben Minuten Begrüßung und Einleitung, 26 Minuten Hörversuch und drei Minuten Erklärung und Verabschiedung.

4.4. Ergebnisse und Auswertungen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Versuchs und die Auswertungen mit dem Statistikprogramm SPSS 18 vorgestellt. Die Auswertungen wurden mithilfe der deskriptiven Statistik vollzogen, das bedeutet, alle Daten werden vollständig erfasst und nicht nur stichprobenweise. Der Surround-Kreis wird dazu anhand der Lautsprecherpositionen in drei Abschnitte eingeteilt: der vordere Bereich ($\pm 30^\circ$), der seitliche Bereich ($\pm 120^\circ$) und der hintere Bereich zwischen 120° und 240° liegend. Die Idee, den Kreis an der 0° -Achse zu spiegeln, funktioniert nur im vorderen und seitlichen Bereich. Im hinteren Bereich kommt es zu Problemen ab 180° . Der nächste 5° -Schritt nach links entspricht -175° (rechte Seite positiv, linke Seite negativ). Für das Statistikprogramm liegen -175° und 180° aber nicht nebeneinander. Deswegen muss für die Auswertung des hinteren Bereichs der Kreis im Ganzen betrachtet werden. Wenn der Kreis halbiert und gespiegelt wird, wird von Bereich C-R und R-RS gesprochen, in denen dann aber die Ergebnisse von den entsprechenden gespiegelten Bereichen auf der anderen Seite C-L und L-LS integriert sind. Unterschiede in der Anzahl der Angaben treten manchmal auf, da teilweise Mehrfachnennungen aufgrund von springender Lokalisation möglich waren. Dazu später mehr. Da für die Auswertungen nur die Lokalisation und Schärfe der Hörereignisse der realen und virtuellen Phantomschallquellen interessant sind, werden auch nur die interauralen Schalldruckpegeldifferenzen betrachtet. Die Lokalisationsschärfe ist somit in dieser Arbeit die scheinbare Ausdehnung der Phantomschallquelle.

4.4.1. Persönliche Angaben der Probanden

Zur besseren Übersicht wurden die Altersangaben in Klassen unter 30, 30 - 39, 40 - 49 und über 50 eingeteilt. Ca. 60 % der Probanden waren unter 30 Jahre alt, 20 % zwischen 30 und 39, 20 % zwischen 40 und 49 und ein geringer Teil ($< 5\%$) war älter als 50 Jahre. Das Verhältnis zwischen den Geschlechtern war 3:1, wobei die Männer dominierten. Etwas mehr als die Hälfte der Probanden waren Studenten, ca. ein Viertel Mitarbeiter der Hochschule der Medien Stuttgart, 10 % Professoren und 10 % sonstige Berufe. Mit 5 % mehr tonerfahrenen Probanden war der Anteil zu den nicht Tonerfahrenen annähernd gleich. Persönliche Angaben wurden in keinem Fall verweigert, sodass diese vollständig erfasst werden konnten. Die entsprechenden Diagramme sind im Anhang unter A.1 zu finden.

4.4.2. Test auf Urteilssicherheit

Während des Hörversuchs wurde jedem Probanden der Stimulus aus dem Center-Lautsprecher dreimal vorgespielt. Die daraus entstandenen zusätzlichen Angaben dienen der Prüfung der Urteilssicherheit. Ziel ist es, anhand der Hörereignisse, die von den Probanden angegeben wurden, herauszufinden, wie weit sie in ihrer Wahrnehmung der Hörereignisrichtung von der Schallquellenrichtung entfernt sind. Die Hörereignisse müssten scharf und bei 0° wahrgenommen worden sein, da im vorderen Bereich die Lokalisation am schärfsten ist und Lautsprecher darüber hinaus Realschallquellen darstellen. Dabei wurde eine Toleranz von $\pm 10^\circ$ zugelassen. Probanden, deren Antworten außerhalb der Toleranz liegen, würden aus der Auswertung des Hörversuches komplett rausfallen, da die Ergebnisse sonst die Statistik beeinträchtigen würden. Wie in dem Diagramm A.5 (im Anhang unter A.2) zu sehen ist, trifft dies auf keinen Probanden zu. Somit können alle Fragebögen der Probanden für die Auswertung verwendet werden. Ein Proband machte bei einem Schallereignis über Lautsprecher aus 0° keine Angaben, allerdings wurde dies durch die zwei weiteren „richtigen“ Angaben entkräftet. Bei der Auswertung der Urteilssicherheit wird mit dem gespiegelten Kreis gearbeitet, sodass im Diagramm A.5 die angegebene Hörereignisrichtung zwischen -10° und $+5^\circ$ liegt.

4.4.3. Lokalisation und Lokalisationsschärfe

Für das Zeigen der Lokalisation sowie der Lokalisationsschärfe wird in den folgenden Diagrammen die Zuordnung von Hörereignisrichtung und interauraler Schalldruckpegeldifferenz dargestellt. Dabei werden immer die Schalldruckpegeldifferenzen zwischen den am jeweiligen Bereich beteiligten zwei Lautsprechern (real und virtuell) genutzt, also im vorderen Bereich die Pegeldifferenz zwischen Center und linkem Lautsprecher bzw. Center und rechtem Lautsprecher; diese Pegeldifferenz kann einer bestimmten Schalleinfallrichtung zugeordnet werden. Für die Auswertung werden nur Angaben ohne Auftreten eines Lokalisationsfehlers verwendet; diese werden später gesondert untersucht.

Die Diagramme sind als Boxplots zu sehen, die den Median, das untere (25 %) und das obere (75 %) Quartil sowie Ausreißer und Extremwerte anzeigen. Boxplots beschreiben grafisch die Verteilung und die Lage der Werte, wobei nicht der Mittelwert, sondern der Median als Zentralwert genommen wird. Der Median ist der Wert, der in der Mitte der geordneten Verteilung liegt. Somit liegt eine Hälfte der Werte über und die andere Hälfte der Werte unter dem Median. Quartile sind Werte, die die geordnete Verteilung der Daten in einem bestimmten Verhältnis in zwei Teilgruppen trennen. Die 25 %-, 50 %- (Median) und 75 %-Quartile unterteilen die Gesamtheit der Werte dementsprechend in vier gleich große Gruppen. Die horizontale Linie in der Box zeigt den Median an und das obere bzw. untere Ende der Box die Quartile. Das heißt, die Hälfte aller Antworten liegen innerhalb der Box. Die vertikale Linie zeigt die Bandbreite der Antworten. Die dünnen Querstriche ober- und unterhalb der Box geben den größten und den kleinsten Wert an, der noch keinen Ausreißer darstellt. Ausreißer sind die Kreise über oder unter der Box. Sie kennzeichnen Werte, die um mehr als das 1,5fache der Boxhöhe über- oder unterhalb der Box liegen. Liegen die Werte mehr als das Dreifache außerhalb, werden sie als Extremwerte betrachtet und mit einem Sternchen gekennzeichnet. Wenn man eine Kurve durch die Mediane legt, sieht man, wie gut die Lokalisation ist. Wenn sie linear verläuft, bedeutet dies eine gute Lokalisation. Wenn die Mediane mit den Quartilen des benachbarten Punktes übereinstimmen, sind die Ergebnisse nicht eindeutig und die Lokalisation ist schlechter.

Die roten großen Buchstaben C, R, L, RS bzw. LS mit der dazugehörigen roten Linie stellen die Positionen der Lautsprecher dar: R für rechter und L für linker Lautsprecher, C für Center, RS für Rechts Surround, also der hintere rechte Lautsprecher, und LS für Links Surround.

4.4.3.1. Vorderer Bereich

Für die frontalen Lautsprecher C-R (genauso wie C-L) gelten die folgenden Erläuterungen. Insgesamt wurden 220 Angaben bei der Lautsprecher-Wiedergabe ermittelt, worin zwei Im-Kopf-Lokalisationen und sieben Vorne-Hinten-Fehler enthalten sind. Somit bleiben noch 211 Fälle für die Auswertung der Lokalisation. Bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker waren es 220 Angaben, wobei eine fehlende Angabe, 30 Im-Kopf-Lokalisationen und 104 Vorne-Hinten-Fehler dabei sind, sodass 85 Fälle für die Auswertung genutzt werden können. Bei der Kopfhörer-Wiedergabe mit eingeschaltetem Headtracker waren es 221 Angaben (eine mehr, da ein Proband ein Schallereignis doppelt lokalisiert hat) mit einer fehlenden Angabe, 26 Im-Kopf-Lokalisationen und 100 Vorne-Hinten-Fehler. Somit stehen 94 Angaben für die Auswertung zur Verfügung.

Wie man im Diagramm 4.10 erkennen kann, ist die Lokalisation bei Lautsprecher-Wiedergabe genau und scharf (nur kleine Boxen). Die Hälfte der Angaben liegen in einem Bereich von 10° und die gedachte Lokalisationskurve zeigt eine gute Lokalisation an. Die wahrgenommenen Hörereignisrichtungen bilden einen linearen Zusammenhang mit den Schalldruckpegeldifferenzen. Die Verschiebung der Phantomschallquelle vom rechten bzw. linken Lautsprecher zum Center-Lautsprecher funktioniert somit sehr gut. Die Schärfe ist bei den Angaben annähernd gleich. Wie anhand der roten Lautsprecherlinien zu sehen ist, werden Phantomschallquellen, die nah an den Lautsprechern (C und R) liegen, aus diesen kommend wahrgenommen.

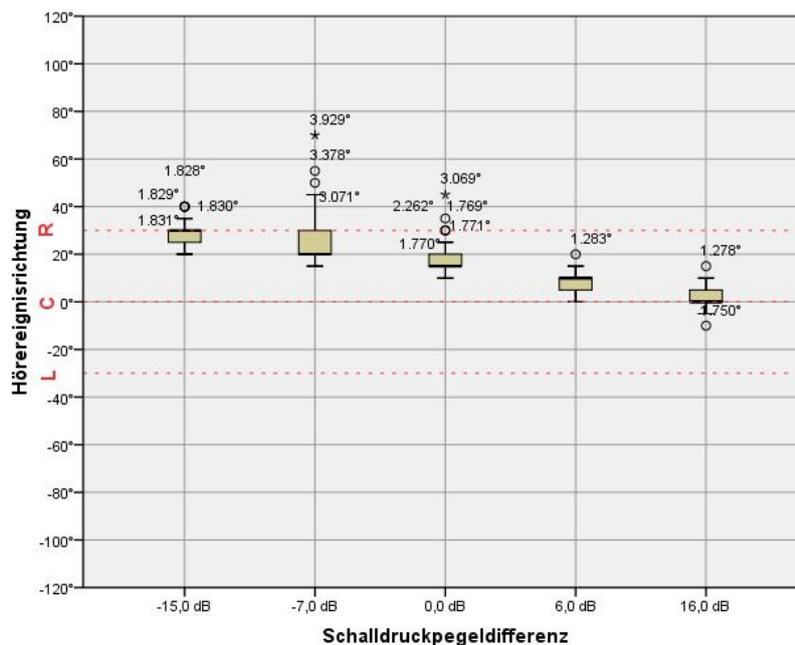


Abbildung 4.10.: Lokalisation im vorderen Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L

Im Gegensatz zur Lautsprecher-Wiedergabe ist bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker die Lokalisation wesentlich unschärfer (Boxen und Bandbreite ist größer) und die wahrgenommenen Richtungen liegen erst ab einer Pegeldifferenz von 6 dB auf der virtuellen Lautsprecherbasis (siehe Abbildung 4.11). Bei kleineren Pegeldifferenzen liegen die Mediane hinter dem seitlichen virtuellen Lautsprecher und bei Pegeldifferenzen unter 0 dB auch die Quartile. Bei einer Pegeldifferenz von 0 dB, wenn sich also die virtuelle Phantomschallquelle genau zwischen beiden virtuellen Lautsprechern befindet, ist die Unschärfe und die Bandbreite am größten und die wahrgenommene Richtung am weitesten von der eigentlichen entfernt. Ab 6 dB Pegeldifferenz, also zum virtuellen Center-Lautsprecher hin, werden die Mediane annehmbar und bei 16 dB

Pegeldifferenz, also nah am Center, ist die Lokalisation gut und scharf – vergleichbar mit der Lokalisation bei der Lautsprecher-Wiedergabe. Bei Nähe zu den virtuellen Lautsprechern ist eine bessere Lokalisation erkennbar, aber bei den virtuellen Phantomschallquellen dazwischen kommt es zu kompletten Fehllokalisationen. Ohne Headtracker ist kein monotoner Zusammenhang wie bei den Lautsprechern zu finden.

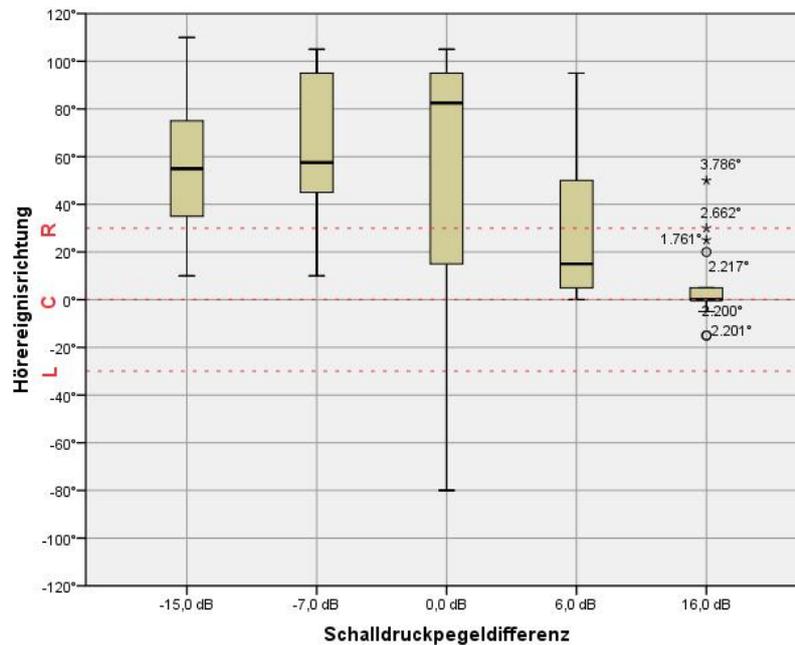


Abbildung 4.11.: Lokalisation im vorderen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L

Bei angeschaltetem Headtracker ist die Lokalisation etwas schärfer und besser (siehe Abbildung 4.12). Zwar stimmen auch hier die wahrgenommenen Richtungen nicht mit den Schallereignisrichtungen überein, aber je größer die Pegeldifferenzen werden, desto mehr nähert sich auch die wahrgenommene Richtung dem Center. Die gedachte Lokalisationskurve durch die Mediane zeigt eine gute Lokalisation an. Bei einer Pegeldifferenz von 0 dB, also mittig zwischen den beiden virtuellen Lautsprechern, ist die Lokalisation gut, also nahe dem virtuellen Center. Allerdings ist auch hier die Schärfe viel schlechter als bei den Lautsprechern. Mit dem Headtracker bleibt demnach der qualitative Zusammenhang wie bei den Lautsprechern erhalten, aber der Bereich der Wahrnehmung der virtuellen Phantomschallquellen ist überdurchschnittlich breit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Lokalisation frontaler virtueller Schallquellen keine vergleichbaren Ergebnisse zu der Lautsprecher-Wiedergabe liefern, der Headtracker aber die Lokalisation verbessert.

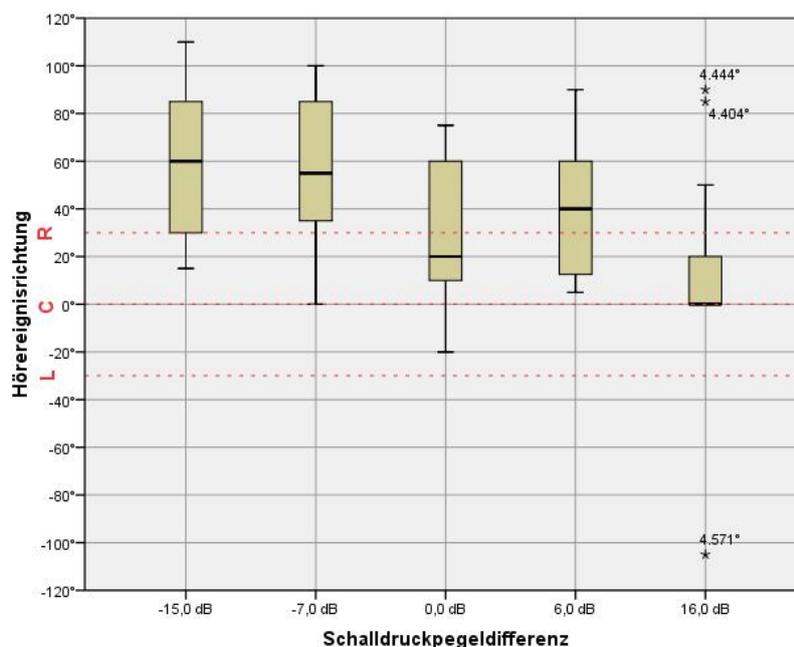


Abbildung 4.12.: Lokalisation im vorderen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für C-R einschl. Daten von C-L

4.4.3.2. Seitlicher Bereich

Die Ergebnisse gelten sowohl für R-RS (der Bereich zwischen rechtem Lautsprecher und rechtem Surround-Lautsprecher) als auch für L-LS (der Bereich zwischen linkem Lautsprecher und linkem Surround-Lautsprecher). Da die linke Seite auf die rechte gespiegelt wurde, wird im folgenden Kapitel nur von R-RS gesprochen. Der seitliche Bereich ist größer als der vordere Bereich. Somit wurden durch die 5°-Einteilung des Kreises mehr Pegeldifferenzen untersucht und mehr Antworten erhalten. Bei der Lautsprecher-Wiedergabe ergaben sich 532 Antworten mit elf fehlenden, sechs Vorne-Hinten-Fehlern und zwei Mal Im-Kopf-Lokalisation, inklusive vier Mehrangaben aufgrund von springender Lokalisation. Somit stehen 513 Fälle für die Auswertung zur Verfügung. Bei der Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker waren es 528 Antworten, wovon nach Abzug von 17 fehlenden, 28 Im-Kopf-Lokalisationen, 29 Vorne-Hinten-Fehlern und vier Links-Rechts-Fehlern 450 Fälle für die Auswertung genutzt werden können. Mit Headtracker ergaben sich 529 Antworten (mit einer Mehrantwort); 465 Fälle bleiben nach Abzug von zwölf fehlenden Angaben, 29 Im-Kopf-Lokalisationen, 21 Vorne-Hinten-Fehlern und zwei Links-Rechts-Fehlern.

Bei der Lautsprecher-Wiedergabe, die als Vergleichsgrundlage für die Kopfhörer-Wiedergabe dient, kann man erkennen, dass Phantomschallquellen, die sich nah an den Lautsprechern befinden, aus diesen kommend wahrgenommen werden; so ist es bei Pegeldifferenzen kleiner gleich - 11 dB und bei Pegeldifferenzen ab 18,5 dB (siehe Abbildung 4.13). Hier bewegen sich die Mediane nahe den RS- bzw. LS-Lautsprecherlinien. Lediglich bei Pegeldifferenzen von 0 dB und 2 dB, also wenn sich die Phantomschallquelle genau zwischen beiden Lautsprechern befindet, werden diese auch annähernd dort wahrgenommen. Allerdings sind die Unschärfe und die Bandbreite sehr groß. Die Verschiebung der Phantomschallquelle funktioniert demnach nur in Sprüngen von Lautsprecher zur Mitte und zum nächsten Lautsprecher. Die Schärfe der lautsprecher-nahen Phantomschallquellen ist sehr groß. Je mehr sie sich den Lautsprechern nähern, desto größer wird die Schärfe und je weiter sie sich entfernen, desto größer wird die Unschärfe. Die Schärfe bei Phantomschallquellen nahe dem vorderen Lautsprecher ist allerdings größer, d.h. Phantomschallquellen im vorderen Bereich werden schärfer wahrgenommen. Das stimmt mit den

Ergebnisse von Medina Victoria ([25], S.4) überein, denn wir können vorne am schärfsten und seitlich am unschärfsten lokalisieren. Es gibt Ausreißer in Lautsprecher-Nähe in alle Richtungen; diese entstehen, weil die Boxen sehr klein sind. Wie man anhand der gedachten Lokalisationskurve erkennt, ist die Lokalisation bei Lautsprecher-Wiedergabe gut.

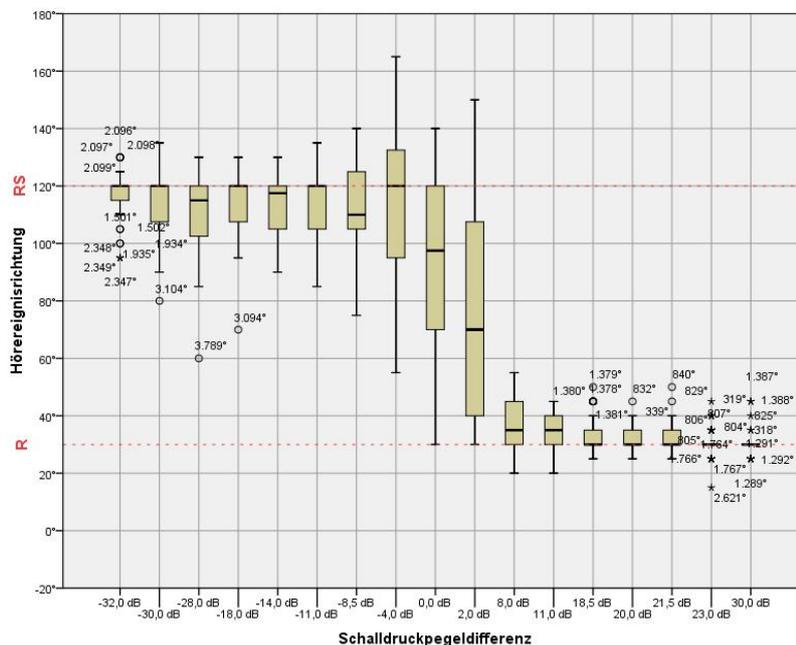


Abbildung 4.13.: Lokalisation im seitlichen Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS

Bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker (siehe Abbildung 4.14) sind sowohl die Boxen als auch die Differenzen zwischen größten und kleinsten Wert viel größer als bei der Lautsprecher-Wiedergabe. Bei Pegeldifferenzen kleiner gleich - 11 dB ist eine Welle um die RS-Lautsprecherlinie zu beobachten, d.h. die Werte schwanken um diese Linie. Bei virtuellen Phantomschallquellen mit Pegeldifferenzen von - 18 dB bis - 4 dB, welche genau neben dem Kopf auftreten (um die 90°), ist die Lokalisation am unsichersten. Ab einer Pegeldifferenz von 0 dB wandert die virtuelle Phantomschallquelle zum vorderen virtuellen Lautsprecher. Ab 20 dB schwanken die Angaben wieder um eine Grenze, die aber nicht die R-Lautsprecher-Linie darstellt, sondern eher der 60°-Linie entspricht. Zu einer Lokalisation am oder im virtuellen Lautsprecher kommt es nicht. Eine lineare Lokalisationskurve kann man durch die Mediane nicht legen. Hier ist es genau umgekehrt zur Lautsprecher-Wiedergabe. Die Schärfe ist bei hinteren virtuellen Phantomschallquellen am größten und im vorderen Bereich von R-RS, ab 90°, am kleinsten. Die Schärfe zwischen R und RS ist nicht schwankend, sondern über 2 dB klein und unter 2 dB groß.

Dies ist ebenfalls bei der Lokalisation mit Headtracker so, wobei hier die Boxen generell größer sind und die Lokalisation unschärfer ist (siehe Abbildung 4.15). Die Lokalisation schwankt an der RS-Lautsprecher-Linie bis Pegeldifferenzen von - 11 dB, allerdings ist das Wandern der virtuellen Phantomschallquelle zum vorderen virtuellen Lautsprecher kontinuierlicher als bei der Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ab 20 dB schwanken die Werte um eine Linie, die aber auch hier eher der 60°-Linie entspricht als der 30°-Lautsprecher-Linie. Nur wenig Ausreißer sind vorhanden, da die Bandbreite der Angaben so groß ist. Zusammenfassend ist somit bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker die Lokalisation nur geringfügig besser und unschärfer; ansonsten sehen die Diagramme mit und ohne Headtracker annähernd gleich aus.

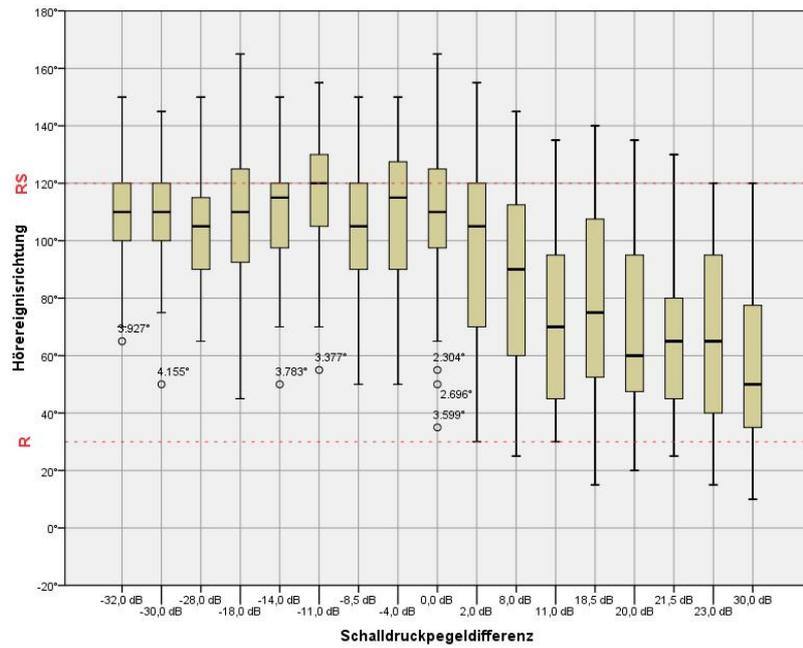


Abbildung 4.14.: Lokalisation im seitlichen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS

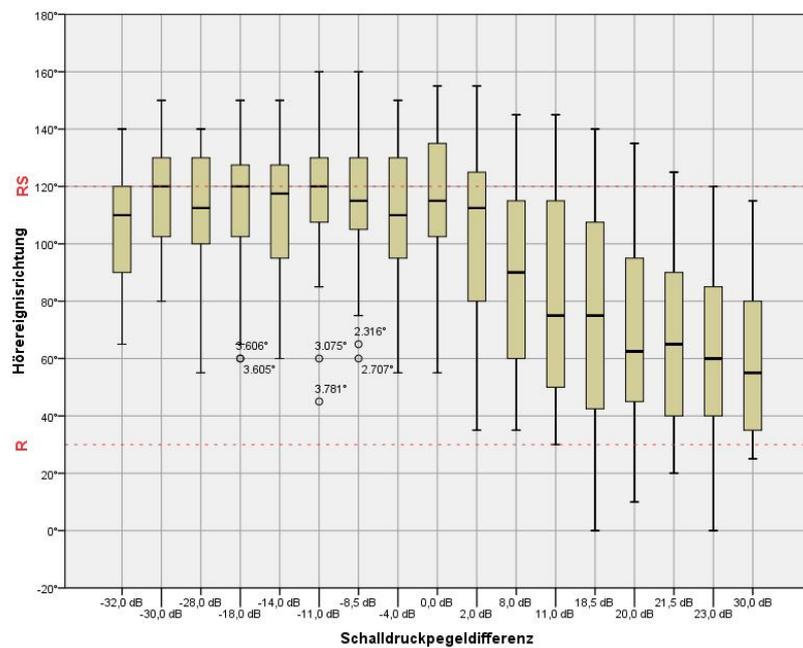


Abbildung 4.15.: Lokalisation im seitlichen Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für R-RS einschl. Daten von L-LS

4.4.3.3. Hinterer Bereich

Da für den Hörversuch der gesamte Kreis betrachtet und die Schallereignisrichtung, ob links oder rechts zu hören, ausgewürfelt wurde, sind die Pegeldifferenzen nicht einheitlich abgestuft, sondern haben Sprünge zwischen - 23 dB und - 8,5 dB und zwischen 0 dB und 11 dB. Auf Grund der Tatsache, dass die Sprünge bei allen Wiedergabe-Verfahren gleich sind, haben sie auf die Ergebnisse keinerlei Auswirkungen.

Auch hier ist – wie im seitlichen Bereich – bei der Lautsprecher-Wiedergabe eine Wahrnehmung der Phantomschallquellen nahe der Lautsprecher aus diesen kommend zu beobachten (siehe Abbildung 4.16). Pegeldifferenzen von - 30 dB bis - 23 dB werden aus dem linken Surround-Lautsprecher und Pegeldifferenzen von 11 dB bis 21 dB aus dem rechten Surround-Lautsprecher wahrgenommen. Insgesamt betrachtet ist die Lokalisation zwischen RS und LS scharf. Sie ist unschärfer als vorne, aber schärfer als seitlich; auch dies entspricht den Ergebnissen von Medina Victoria ([25], S.4). Pegeldifferenzen ab - 8,5 dB bis 0 dB wandern zum rechten Surround-Lautsprecher. Durch die Sprünge kann man die Kontinuität des Wanderns der Phantomschallquelle nur an diesen Werten ablesen, aber trotzdem kann anhand dieser eine Lokalisationskurve gut durch die Mediane gelegt werden. Die Ausreißer und Extremwerte ergeben sich durch die geringer Streuung der Hälfte der Angaben (kleine Boxen). Allerdings befinden sich die meisten außerhalb von RS-LS, also zu den vorderen Lautsprechern hin, und nur in einem Bereich von +/- 40° um den Lautsprecher herum. Bei einer Pegeldifferenz von 0 dB, also genau zwischen beiden Surround-Lautsprechern, ist die wahrgenommene Richtung zu weit links.

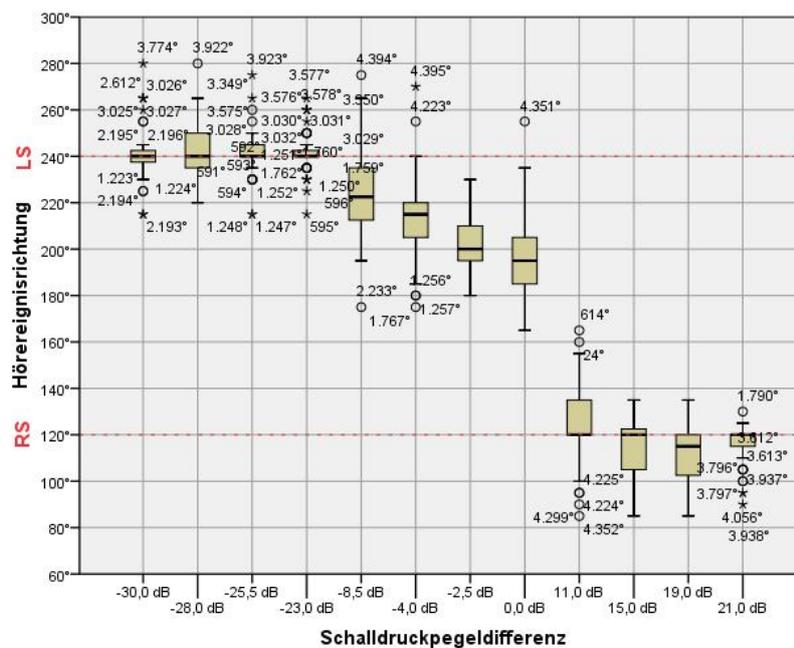


Abbildung 4.16.: Lokalisation im hinteren Bereich bei Lautsprecher-Wiedergabe. Ergebnisse für RS-LS

Die Hörversuche haben ergeben, dass die Kopfhörer-Wiedergabe ohne eingeschalteten Headtracker im Hinten-Bereich schärfer ist als seitlich oder vorne (siehe Abbildung 4.17). Das ist eine überraschende Erkenntnis, da dies der Lokalisationsschärfe bei der Lautsprecher-Wiedergabe widerspricht. An die Schärfe der Wiedergabe über Lautsprecher kommt sie aber nicht heran. Wie bei den Lautsprechern werden die virtuellen Phantomschallquellen mit Pegeldifferenz zwischen - 30 dB und - 23 dB nahe den virtuellen Lautsprechern wahrgenommen; in diesem Fall eher vor den virtuellen Lautsprechern bei ca. 250°. Virtuelle Phantomschallquellen mit Pegeldiffe-

renzen zwischen 15 dB und 21 dB werden an dem rechten virtuellen Surround-Lautsprecher wahrgenommen. Im Unterschied zur Lautsprecher-Wiedergabe werden allerdings virtuelle Phantomschallquellen mit einer Differenz von 11 dB nicht ganz seitlich wahrgenommen. Zwischen -8,5 dB und 11 dB wandert die virtuelle Phantomschallquelle vom linken zum rechten virtuellen Surround-Lautsprecher, allerdings nicht kontinuierlich. Zwischen -4 dB und 0 dB Pegeldifferenz liegen die Hörereignisrichtungen um 180°, was genau die Mitte zwischen beiden virtuellen Lautsprechern darstellt. Die Lokalisation bei 0 dB Pegeldifferenz ist gut und scharf. Das ist ein überraschendes Ergebnis, da sie besser als bei Lautsprecher-Wiedergabe ist; dies entspricht aber nicht dem natürlichen Hören. Insgesamt gesehen ist die Lokalisation schlechter und die Schärfe geringer als bei der Wiedergabe über Lautsprecher.

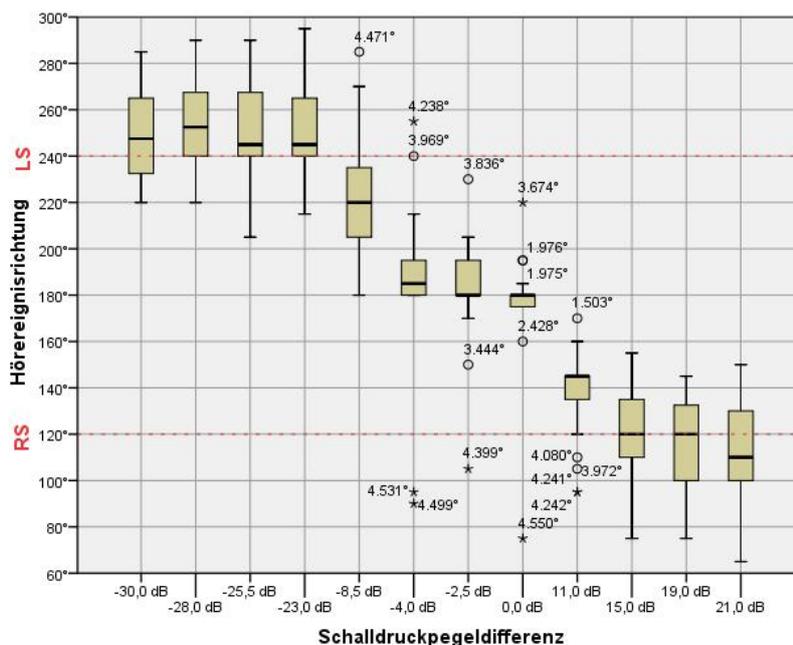


Abbildung 4.17.: Lokalisation im hinteren Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker. Ergebnisse für RS-LS

Die Lokalisation bei der Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker ist analog zu der Lokalisation ohne Headtracker im Hinten-Bereich schärfer als vorne und seitlich (siehe Abbildung 4.18). Wenn man beide Boxplots der Kopfhörer-Wiedergabe genau betrachtet, fällt auf, dass sie sich ähnlich sind. Im Vergleich zur Lokalisation ohne Headtracker ist die mit Headtracker geringfügig unschärfer, dafür aber besser. Die Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker bietet aber vergleichbare Lokalisationsergebnisse zur Lautsprecher-Wiedergabe und genau hinter dem Probanden sogar eine bessere Lokalisation.

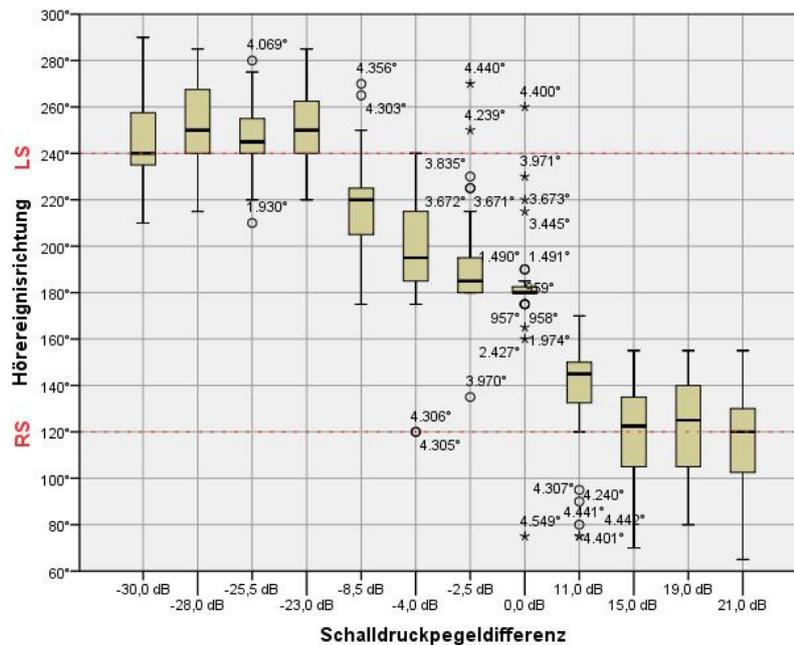


Abbildung 4.18.: Lokalisation im hinteren Bereich bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker. Ergebnisse für RS-LS

4.4.3.4. Einfluss der Tonerfahrung auf das Lokalisationsvermögen der Probanden

Interessant ist außerdem der Aspekt, ob die Tonerfahrung der Probanden einen Einfluss auf die Lokalisation hat. Mit Tonerfahrung ist in diesem Fall gemeint, ob der Proband bereits Erfahrungen im Tonstudio sammeln konnte. In der Auswertung werden die Lokalisationsergebnisse von Probanden mit Tonerfahrungen denen der Probanden ohne Tonerfahrungen gegenübergestellt. Wenn man die Mediane und Quartile der Boxplots der Profis (mit Tonerfahrung) mit denen der Laien (ohne Tonerfahrung) vergleicht, sieht man, dass die Lokalisation der Profis besser und schärfer ist. Diagramme, in denen man dieses gut erkennen kann, sind im Anhang unter A.3.1. zu finden.

4.4.3.5. Zusammenhang zwischen empfundener und tatsächlicher Lokalisationsschärfe

Die Probanden mussten nicht nur die Richtung des Hörereignisses, sondern auch die Lokalisationsschärfe auf dem Fragebogen angeben. Interessant ist, ob die empfundene Lokalisationsschärfe mit der tatsächlichen Schärfe übereinstimmt. Dazu wurden von den Angaben Histogramme (0 unscharf, 6 scharf) für Lautsprecher-Wiedergabe sowie Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und mit Headtracker für alle drei Bereiche erstellt (Diagramme sind im Anhang unter A.3.2. zu finden) und mit den entsprechenden Schärfe in den Boxplots verglichen.

Sowohl die Histogramme (A.3.2. im Anhang) als auch die Boxplots (Abschnitt 4.4.3.) zeigen, dass die Lokalisation bei Lautsprecher-Wiedergabe in allen Bereichen scharf ist. Am eindeutigsten und schärfsten ist sie im vorderen Bereich, am unschärfsten im hinteren Bereich. Die Histogramme der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe sind annähernd normalverteilt (zu sehen an der Gauß-Kurve in den Histogrammen) und haben immer eindeutige Maxima im scharfen Bereich. Dies entspricht den bisherigen Ergebnissen und der Schärfe in den Boxplots.

Bei der Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker widerspricht es vor allem seitlich der Schärfe, die in den Boxplots zu sehen ist. Die empfundene Schärfe ist seitlich am schärfsten, vorne hat es ein eindeutiges Maxima bei unscharf und das Histogramm für hinten ist nicht normalverteilt, hat aber ein Maxima bei scharf. Die tatsächliche Schärfe in den Boxplots hingegen ist hinten

am schärfsten und seitlich am unschärfsten. Wurde der Headtracker hinzugeschaltet, hat vorne die Fragestellung nicht funktioniert. Im Histogramm sind zwei gegensätzliche Maxima bei scharf und unscharf zu erkennen und die Verteilung entspricht genau dem entgegengesetzten einer Normalverteilung. Die Schärfe wurde also uneindeutig wahrgenommen: ein Teil der Probanden stufte sie scharf und der andere Teil unscharf ein. Die Lokalisation ist somit unsicher. Seitlich hingegen ist sie am schärfsten und hinten annähernd normalverteilt, mit einem Maxima bei scharf. Einerseits widerspricht die empfundene Schärfe der Schärfe in den Boxplots, da diese hinten am größten ist, und andererseits stimmen sie im vorderen Bereich überein, wo die Lokalisation unsicher und unscharf ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Erkenntnis der unscharfen Lokalisation der Kopfhörer im Gegensatz zu den Lautsprechern durch die empfundene Lokalisationsschärfe bestätigt wird, und dass die Lokalisation bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker insgesamt betrachtet unschärfer ist als mit Headtracker.

4.4.4. Fehllokalisationen

Da die Headzone-Kopfhörer nur eine virtuelle Realität simulieren, können bestimmte Lokalisationsfehler auftreten. Falls diese bei Lautsprecher-Wiedergabe vermehrt auftreten, liegt ein Fehler bei dem Versuch oder der Auswertung vor.

4.4.4.1. Definition und Auftreten des Vorne-Hinten-Fehlers sowie des Links-Rechts-Fehlers

Der Vorne-Hinten-Fehler bedeutet, dass eine Fehllokalisation auftritt, wenn die Richtungen vorne und hinten vertauscht werden. Wie bereits erwähnt, kann das vor allem bei den Schnittpunkten der Horizontalebene mit der Medianebene (0° und 180°) vorkommen, da in diesem Fall keine interauralen Pegel- und Laufzeitdifferenzen entstehen. Die Frage hierbei ist, wo ein Fehler anfängt und wo er aufhört. Die Grenzen müssen gesetzt werden anhand der Daten. Dafür wurden die Boxplots der Hörereignisrichtung über interauraler Schalldruckpegeldifferenz der an den jeweiligen Richtungsbereichen beteiligten beiden Lautsprecher betrachtet. Für den vorderen und den seitlichen Bereich wird der gespiegelte Kreis und für hinten der komplette Kreis zugrunde gelegt und für alle drei Bereiche gesondert betrachtet.

Die Extremwerte in den Boxplots kennzeichnen die Fehler. Allerdings nur die Extremwerte, die auch wirklich „weit“ vom Median entfernt sind. Wenn die Quartile (25 % und 75 %) zu nah am Median liegen, weil die Streuung der Angaben gering ist, können „nahe“ Extremwerte entstehen. Diese blieben für die Fehlersuche unbeachtet. Anhand der Extremwerte werden der Links-Rechts-Fehler und der Vorne-Hinten-Fehler definiert. Bei dem Vorne-Hinten-Fehler liegt das Augenmerk vor allem auf den Lautsprecher-Boxplots, da man bei den Kopfhörern den Fehler schlechter erkennen kann. An den Lautsprecher-Boxplots sieht man es sehr gut, da die Schärfe höher ist und somit die Boxen kleiner. Die Zahlen an den Ausreißern und Extremwerten in den Boxplots sind die Fallnummern des Hörversuches im Statistikprogramm. Der obere Grenzwert des Vorne-Hinten-Fehlers befindet sich bei 180° , da dies die maximale Entfernung in einem Kreis ist. In dem Boxplot für Lautsprecher und für den seitlichen Bereich (siehe Abbildung A.23 im Anhang unter A.3.3.1.) sieht man bei einer Pegeldifferenz von 8 dB (entspricht ca. 65°) ein Extremwert der Hörereignisrichtung bei 155° , was einem Abstand zwischen den beiden Richtungen von 90° entspricht. Dieser Wert bildet die untere Grenze. Werte der Richtungen, die zu nah an der 90° -Linie liegen ($\pm 20^\circ$), dürfen aufgrund ihrer Nähe zur 90° -Linie nicht für den Vorne-Hinten-Fehler verwendet werden. Somit lautet die Definition des Vorne-Hinten-Fehlers wie folgt:

Ein Vorne-Hinten-Fehler tritt auf, wenn

1. der Abstand zwischen Schallereignisrichtung und Hörereignisrichtung 90° ist und
2. der Wert einer Richtung auf dem oberen Halbkreis zwischen 70° und -70° (gespiegelter Kreis) bzw. 70° und 290° (ganzer Kreis) und der Wert der anderen Richtung auf dem unteren Halbkreis zwischen 110° und -110° (gespiegelter Kreis) bzw. 11° und 250° (ganzer Kreis) liegt.

Tabelle 4.1.: Auftreten des Vorne-Hinten-Fehlers

	vorderer Bereich	seitlicher Bereich	hinterer Bereich
Lautsprecher	7	2	6
in Prozent	3,2	0,3	1,2
Kopfhörer ohne Headtracker	104	26	29
in Prozent	47,5	3,5	5,7
Kopfhörer mit Headtracker	100	27	21
in Prozent	45,5	3,6	4,1

An den Ergebnissen ist abzulesen, dass Vorne-Hinten-Fehler bei Lautsprecher-Wiedergabe kaum auftraten und bei Kopfhörer-Wiedergabe vorwiegend vorne. Hier betrifft der Fehler fast die Hälfte der Angaben. Wie bereits erwähnt, taucht der Fehler vor allem in den Schnittpunkten der Horizontalebene mit der Medianebene auf, da dort keine Laufzeit- und Pegeldifferenzen entstehen und die Lokalisation schwieriger ist. Dieser Fehler ist ganz natürlich und kommt auch beim realen Hören vor. Das bereits erwähnte Problem der Kopfhörer-Wiedergabe, dass viele frontale virtuelle Schallquellen hinten wahrgenommen werden, wird hiermit bestätigt. Umgekehrt ist es deutlich weniger und liegt genauso wie bei der seitlichen Lokalisation absolut im Rahmen.

Der Links-Rechts-Fehler kommt zustande, wenn die Richtungen links und rechts miteinander vertauscht werden. Er kommt beim natürlichen Hören nicht vor, da an den Ohren je nach Richtung des seitlichen Schalleinfalls unterschiedliche Pegel- und Laufzeitdifferenzen entstehen. Aber auch hier stellt sich die Frage nach einer passenden Fehlerdefinition. Die Links-Rechts-Fehler sind gut an den Extremwerten der Boxplots abzulesen, wobei es sich als schwierig erwies, herauszufinden, ob es nur eine unscharfe Lokalisation oder bereits ein Links-Rechts-Fehler war. Deswegen muss auch hier ein gewisser Mindestabstand zwischen der Schallereignis- und der Hörereignisrichtung liegen. Logisch erscheint hingegen, dass die beiden Richtungen unterschiedliche Vorzeichen haben bzw. der Wert der einen Richtung größer und der Wert der anderen Richtung kleiner 180° (ganzer Kreis) sein muss. Außerdem dürfen sie nicht zu nah an 0° bzw. 180° liegen. Der weiteste Abstand kann in einem Kreis nur 180° sein; das ist somit die obere Grenze. Die untere Grenze kann man gut in dem Lautsprecher-Boxplot des seitlichen Bereichs (siehe Abbildung A.23 im Anhang unter A.3.1.1.) erkennen. Die Extremwerte bei der Pegeldifferenz von 21,5 dB (entspricht ca. 45°) liegen bei -35° und -25° , was einem Abstand zwischen den beiden Richtungen von 80° und 70° entspricht. 70° bildet somit die untere Grenze. Folglich ergibt sich folgende Definition des Links-Rechts-Fehlers:

Ein Links-Rechts-Fehler tritt auf, wenn

1. die Hörereignisrichtung und die Schallereignisrichtung auf unterschiedlichen Seiten des Kreises (links und rechts) liegen, also unterschiedliche Vorzeichen (bei einem Halbkreis) haben bzw. ein Wert kleiner und der andere Wert größer 180° ist und

2. beide Werte ungleich 0° und 180° sind und
3. der Abstand zwischen den Werten der beiden Richtungen mindestens 70° ist.

Tabelle 4.2.: Auftreten des Links-Rechts-Fehlers

	vorderer Bereich	seitlicher Bereich	hinterer Bereich
Lautsprecher	0	3	0
in Prozent	0	0,4	0
Kopfhörer ohne Headtracker	0	5	4
in Prozent	0	0,7	0,8
Kopfhörer mit Headtracker	0	2	2
in Prozent	0	0,3	0,4

Wie zu erwarten war, trat der Links-Rechts-Fehler sehr wenig auf; vorne überhaupt nicht und bei Lautsprecher-Wiedergabe nur seitlich. Der Wert bei der Lautsprecher-Wiedergabe ist aber so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Bei der Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker tritt er etwas öfter auf als bei der Wiedergabe mit Headtracker. Außerdem kann man an dem Diagramm A.24 (im Anhang unter A.3.3.1.) ablesen, dass Schallereignisse der rechten Seite mit ca. 20 % mehr auf der linken Seite lokalisiert werden als umgekehrt. Links-Rechts ist eine ungewöhnliche Spiegelung. Die Bandbreite der gefühlten Schärfe ist vollkommen ausgenutzt. Im Balkendiagramm A.24 auf Seite 63 sieht man die komplette Verteilung des Links-Rechts-Fehlers. Es wurden insgesamt 16 Fehler von 13 Probanden wahrgenommen.

Interessant zu betrachten ist, wenn beide Fehler gleichzeitig auftreten. Dies ist von 5156 Fällen nur 4 x der Fall und nur bei Kopfhörer-Wiedergabe (1 x mit Headtracker und 3 x ohne Headtracker) und nur bei Beschallung von der Seite: 1 x bei -70° und 3 x bei 45° . Sie wurden alle vier als unscharf empfunden und von verschiedenen Probanden angegeben. Das Hörereignis wurde dabei diagonal gegenüber von dem Schallereignis wahrgenommen. Dieses ist ein psychoakustisches Phänomen, das aber gesondert untersucht werden müsste.

4.4.4.2. Im-Kopf-Lokalisation

Im-Kopf-Lokalisation tritt zumeist bei Kopfhörer-Wiedergabe auf, wenn das ankommende Signal keiner Hörereignisrichtung zugeordnet werden kann. Sie kommt vereinzelt auch bei Lautsprecher-Wiedergabe vor.

Tabelle 4.3.: Auftreten der Im-Kopf-Lokalisation

	vorderer Bereich	seitlicher Bereich	hinterer Bereich
Lautsprecher	2	0	2
in Prozent	0,9	0	0,4
Kopfhörer ohne Headtracker	30	5	28
in Prozent	13,7	0,7	5,5
Kopfhörer mit Headtracker	26	4	29
in Prozent	11,8	0,5	5,6

Man erkennt, dass die Im-Kopf-Lokalisation vor allem vorne und hinten auftritt. Das Auftreten der Im-Kopf-Lokalisation bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und mit Headtracker ist annähernd gleich verteilt. Bei Lautsprecher-Wiedergabe kann die Im-Kopf-Lokalisation aufgrund des wenigen Auftretens vernachlässigt werden.

4.4.4.3. Fehlende Angaben

Bei fehlenden Angaben auf den Fragebögen ist in Abhängigkeit der Anzahl der fehlenden Angaben zu entscheiden, ob der jeweilige Fragebogen benutzt werden kann oder besser vollständig aus der Auswertung herausgenommen werden muss. Fehlende Angaben werden bei der Auswertung als Sonderfälle betrachtet und fließen somit nicht mit in die Statistikauswertungen ein.

Tabelle 4.4.: Vorkommen der fehlenden Angaben

	vorderer Bereich	seitlicher Bereich	hinterer Bereich
Lautsprecher	0	0	11
in Prozent	0	0	2,1
Kopfhörer ohne Headtracker	1	9	17
in Prozent	0,5	1,2	3,2
Kopfhörer mit Headtracker	1	0	12
in Prozent	0,5	0	2,3

Auffällig ist, dass im hinteren Bereich von allen Bereichen die meisten Angaben fehlen, speziell bei der Wiedergabe über Kopfhörer ohne Headtracker. Allerdings bleibt die Anzahl der fehlenden Angaben im Rahmen, sodass kein Handlungsbedarf besteht.

4.4.4.4. Doppelte Angaben

Ein Proband hat springende Lokalisationen bei sechs Stimuli wahrgenommen, davon vier über Lautsprecher und zwei über Kopfhörer mit eingeschaltetem Headtracker (fünf hinten und einen vorne). Über Lautsprecher und hinten hatte er die Stimuli an der richtigen Stelle sowie genau entgegengesetzt wahrgenommen und alle als unscharf angegeben, bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker im vorderen Bereich ebenfalls an der richtigen Stelle sowie entgegengesetzt und im hinteren Bereich an der richtigen Stelle und Im-Kopf-Lokalisation.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit, sollte untersucht werden, ob Headzone Pro zur Lautsprecher-Wiedergabe vergleichbare Ergebnisse liefert und ob der Headtracker die Lokalisation verbessert. Die Auswertungen des Hörversuchs haben ergeben, dass Headzone insgesamt gute, aber mit der Lautsprecher-Anordnung nicht vergleichbare Ergebnisse liefert. Bei Wiedergabe mit dem Headzone ist die Lokalisationsschärfe entgegengesetzt zum natürlichen Hören: hinten am schärfsten und vorne am schlechtesten. Probleme treten in den Schnittpunkten der Horizontal- mit der Medianebene auf. Hier nehmen ca. die Hälfte aller Probanden eine frontale virtuelle Schallquelle hinten wahr. Dafür hat das System gut bei der Im-Kopf-Lokalisation abgeschnitten; vorne ca. 13 % und hinten ca. 5 %. Im Vergleich: Bei Wiedergabe über einen normalen Kopfhörer werden alle Hörereignisse im Kopf lokalisiert. An den Auswertungen der Fehler ist eindeutig sichtbar, dass die virtuelle Lautsprecher-Anordnung mit Headtracker näher an die reale kommt. Deshalb sollte bei virtuellen Kopfhörer-Surround-Systemen immer mit Headtracking gearbeitet werden um eine stabile Lokalisation zu gewährleisten. Wie vorauszusehen war, kommt Headzone nicht an die Ergebnisse der Lokalisation bei Lautsprecher-Wiedergabe ran. Headzone soll auch keinen Ersatz für die Wiedergabe über Lautsprecher sein, sondern vielmehr ein gleichwertiges System für Einsatzorte, bei denen eine Surround-Aufstellung nicht umsetzbar ist, z.B. Ü-wagen. Auch beim Sounddesign von Computerspielen bietet Headzone PRO XT HT eine gute Alternative, vor allem zu normalen Kopfhörern. Allerdings sind einige Verbesserungen notwendig um effektiver damit arbeiten zu können. Die virtuellen Lautsprecher werden über richtungsabhängige HRTFs dargestellt, die von einem Kunstkopf mit modellhaft nachgebildeten Ohren stammen und in Echtzeit auf das Signal gefaltet werden. Genau da liegt das Problem! Der Anwender hört mit fremden Ohren, wodurch Fehllokalisationen entstehen. Denen kann man nur entgegenwirken mittels individueller HRTFs, die man zukünftig ermitteln lassen und in das Gerät einspeisen könnte. Interessant wäre zu untersuchen, ob die gleichen Ergebnisse erzielt werden würden, wenn die Beeinflussung der Lautsprecher auf den Probanden durch Abdeckungen unterbunden wäre oder der visuelle Sinn der Probanden durch Einsatz von Dummy-Lautsprechern überlistet werden würde. Wenn das Problem der individuellen HRTFs gelöst wird, kommt Headzone Pro XT HT als mobiles Surround-Kopfhörersystem in professionellen Tonregien eine bedeutende Rolle zu.

Literaturverzeichnis

- [1] Beilharz, R.: „Hören ohne Raum“, *Music & PC* 04/2008
- [2] Beyerdynamic GmbH & Co.KG: „Beyerdynamic Headzone PRO“, Internetauftritt, 2009, <http://www.beyerdynamic.de/broadcast-studio-video-production/produkte/kopfhoerer-hoer-sprech-kombinationen/headzone-pro1.html>
- [3] Beyerdynamic GmbH & Co.KG: „Headzone PRO XT Bedienungsanleitung“, Heilbronn 2009
- [4] Grooff, P.: „Spot on Rechnology – Wie wähle ich meinen Kopfhörer?“, v0.7, Beyerdynamic GmbH & Co.KG, Heilbronn 2008
- [5] Blauert, J.: „Ein neuartiges Präsenzfilter“, *Fernseh- und Kinotechnik*, Nr.3, 1970, S. 75ff.
- [6] Blauert, J.: *Räumliches Hören*. 1. Auflage, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1974
- [7] Bortz, J. & Döring, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4., überarbeitete Auflage, Springer Medizin Verlag, Berlin Heidelberg 2006
- [8] Bräuning, S.: „Kopfhörer“, Tonseminar an der Hochschule der Medien Stuttgart, 2006
- [9] Brosius, F.: *SPSS 16 – Das mitp-Standardwerk*. 1. Auflage, Mitp-Verlag Redline, Heidelberg 2008
- [10] Dickreiter, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Band 1, 6., verbesserte Auflage, K. G. Saur Verlag, München 1997
- [11] Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W. & Wöhr, M.: *Handbuch der Tonstudioteknik*. Band 1, 7., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, K. G. Saur Verlag, München 2008
- [12] Eckle-Kohler, J. & Kohler, M.: *Eine Einführung in die Statistik und ihre Anwendungen*. 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2009
- [13] Eco, U.: *Wie man eine wissenschaftliche Abschlußarbeit schreibt. Doktor-, Diplom- und Magisterarbeit in den Geistes- und Sozialwissenschaften*. 8. Auflage, C. F. Müller Verlag, Heidelberg 2000
- [14] EMT Studioteknik GmbH: „Phönix 5.1 Vorabinformation“, Mahlberg 2005
- [15] Goldstein, E. B.: *Wahrnehmungspsychologie – der Grundkurs*. 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008
- [16] Görne, T.: *Tontechnik*. 2., aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2008
- [17] Grooff, P.: Telefonat am 02.07.2009 über Headzone PRO, Beyerdynamic GmbH & Co. KG
- [18] Horbach, U., Pelligrini, R., Felderhof, U. & Theile, G.: „Ein virtueller Surround Sound Abhörraum im Ü-Wagen“, Bericht der 20. Tonmeistertagung 1998, S. 238ff.

- [19] Huber, T.: „Zur Lokalisation akustischer Objekte bei Wellenfeldsynthese“, Entwurf zur Diplomarbeit, IRT München, 2002
- [20] ITU-R BS.775-1: „Multichannel stereophonic sound system with and without accompanying picture“, Recommendation, International Telecommunications Union, Geneva, Switzerland, 1992/1994
- [21] Kasemann, M.: Telefonat am 22.02.2010 über Headzone Pro XT HT, Beyerdynamic GmbH & Co. KG
- [22] Knieper, T.: *Statistik – Eine Einführung für Kommunikationsberufe*. 1. Auflage, Ölschläger Verlag, München 1993
- [23] Lindau, A., Klemmer, M. & Weinzierl, S.: „Zur binauralen Simulation verteilter Schallquellen“, Tagungsbericht DAGA 2008 Dresden, S. 897f.
- [24] Majdak, P. & Noistemig, M.: „Implementation kopfpositionsbezogener Binauraltechnik“, Diplomarbeit an der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 2002
- [25] Medina Victoria, J. & Görne, T.: „Apparent Source Width in ITU Surround“, Preprint 7809, AES 126th Convention, Munich, Germany, 2009
- [26] Menzel, D., Wittek, H., Theile, G. & Fastl, H.: „The Binaural Sky: A Virtual Headphone for Binaural Room Synthesis“, Tonmeistersymposium des VDT, Hohenkammer 2005
- [27] Georg Neumann GmbH: „Der Kunstkopf – Theorie und Praxis“, Berlin 1989
- [28] Pelligrini, R.: „A Virtual Reference Listening Room as an Application of Auditory Virtual Environments“, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, 2001
- [29] Pelligrino, R., Kuhn, C. & Gebhard, M.: „Headphones Technology for Surround Sound Monitoring – A Virtual 5.1 Listening Room“, Preprint 7068, AES 122nd Convention, Vienna, Austria, 2009
- [30] Peus, S.: „Natürliches Hören mit künstlichem Kopf“, *Funkschau Sonderdruck*, 6/1983, Franzis Verlag, München 2009
- [31] Pfitzenmaier, J.: „Richtungs- und Entfernungsabbildung in der Fünfkanaal-Stereofonie bei der Mischung von Popmusik“, Diplomarbeit an der Hochschule der Medien Stuttgart, 2005
- [32] Plenge, G.: „Über das Problem der Im-Kopf-Lokalisation“, *Acoustica* Vol. 26, 1972, S. 241ff.
- [33] Rodens, S.: E-Mail vom 04.02.2010 über den Surround-Panner von Cubase, Steinberg Media Technologies GmbH
- [34] Sengpiel, E.: „Die Bedeutung der Blauertschen Bänder für die Tonaufnahme“, Universität der Künste Berlin, 1995,
www.sengpielaudio.com/DieBedeutungDerBlauertschenBaender.pdf
- [35] Sengpiel, E.: „Die Richtungswahrnehmung nicht nur in der Medianebene“, Universität der Künste Berlin, 1994,
www.sengpielaudio.com/DieRichtungswahrnehmungMedianebene.pdf
- [36] Sengpiel, E.: „Frequenzabhängige Hörereignisrichtung bei Stereo-Lautsprecherlokalisation“, Universität der Künste Berlin, 1994,
www.sengpielaudio.com/FrequenzabhHoerereignisrichtung.pdf

- [37] Sengpiel, E.: „Kopfbezogene Übertragungsfunktion HRTF“, Universität der Künste Berlin, 1995,
www.sengpielaudio.com/KopfbezogeneUebertragungsfunktionHRTF.pdf
- [38] Sengpiel, E.: „Lokalisation und Ortung – gibt es einen Unterschied?“, Universität der Künste Berlin, 2002,
www.sengpielaudio.com/UnterscheideLokalisationVonLateralisation.pdf
- [39] Sengpiel, E.: „„Richtungsbestimmende Bänder“ und „Kurven gleicher Lautstärke“, Universität der Künste Berlin, 1992,
www.sengpielaudio.com/RichtungsbestimmendeBaenderKurvenGleiLautst.pdf
- [40] Sengpiel, E.: „Stereo-Abbildung und Lokalisationsschärfe“, Universität der Künste Berlin, 2002,
www.sengpielaudio.com/StereoAbbildungLokalisationsschaerfe.pdf
- [41] Sengpiel, E.: „Unterscheide Lokalisation von Lateralisation“, Universität der Künste Berlin, 1997,
www.sengpielaudio.com/UnterscheideLokalisationVonLateralisation.pdf
- [42] Surround Sound Forum: „Hörbedingungen und Wiedergabeanordnungen für Mehrkanal-Stereofonie“, SSF – 01.1/2002
- [43] Surround Sound Forum: „Mehrkanal-Surround-Sound: Systeme und Betriebsanwendungen“, SSF – 04.1/2002
- [44] Thanner, M.: „Einfluß von Kopfbewegungen auf die Lokalisation in der Medianebene“, Diplomarbeit an der Fachhochschule München, 1999
- [45] Theile, G.: „Über die Lokalisation im überlagerten Schallfeld“, Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 1980
- [46] Theile, G.: „Zur Theorie der optimalen Wiedergabe von stereofonen Signalen über Lautsprecher und Kopfhörer“, Rundfunktechnische Mitteilung 1981, S. 155ff
- [47] Wegmann, D.: „Zu Unterschieden in der Hörereigniswahrnehmung bei Wellenfeldsynthese und Stereofonie im Vergleich zum natürlichen Hören“, Diplomarbeit an der Fachhochschule Oldenburg, 2005
- [48] Weinzierl, S. (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008
- [49] Zieglmeier, W. & Theile, G.: „Darstellung seitlicher Schallquellen bei Anwendung des 3/2-Stereo Formates“, Bericht der 19. Tonmeistertagung 1996, S. 159ff.
- [50] Wegmann, D.: „Zu Unterschieden in der Hörereigniswahrnehmung bei Wellenfeldsynthese und Stereofonie im Vergleich zum natürlichen Hören“, Diplomarbeit an der Fachhochschule Oldenburg, 2005
- [51] Blauert, J.: „Ein neuartiges Präsenzfilter“, Fernseh- und Kinotechnik, Nr.3, 1970, S. 75ff.

A. Diagramme zu 4.4

A.1. persönliche Angaben der Probanden

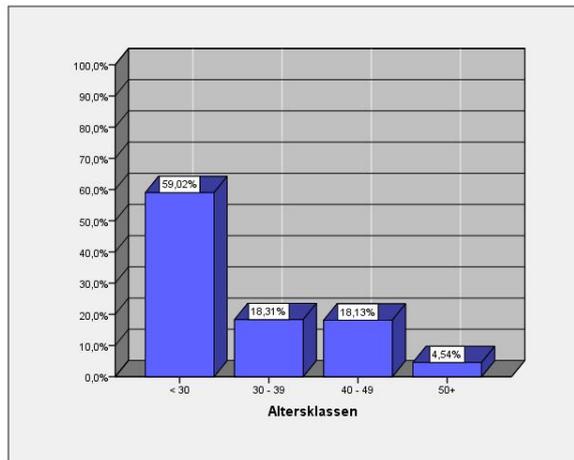


Abbildung A.1.: Alter der Probanden in Klassen unterteilt

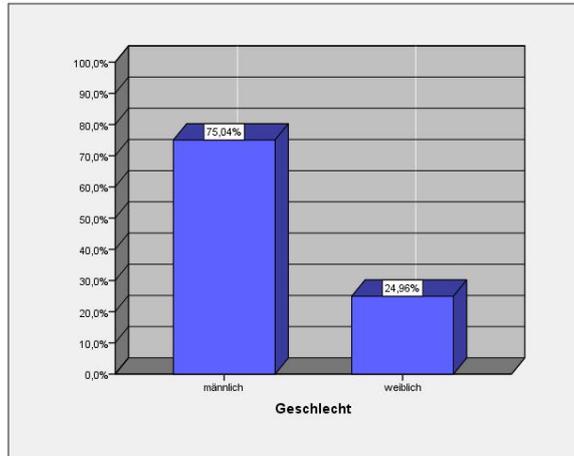


Abbildung A.2.: Geschlecht der Probanden

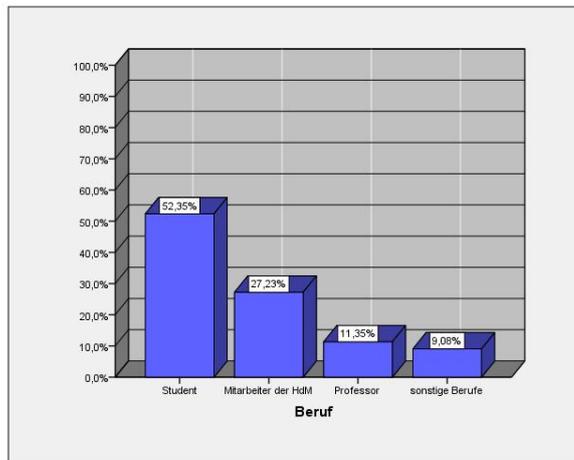


Abbildung A.3.: Berufe der Probanden

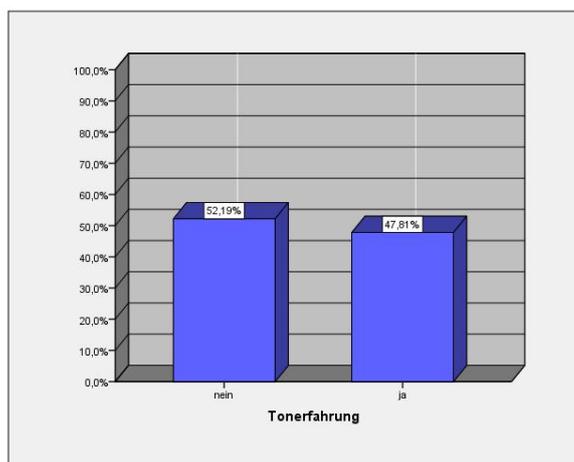


Abbildung A.4.: Tonerfahrung der Probanden

A.2. Test auf Urteilssicherheit

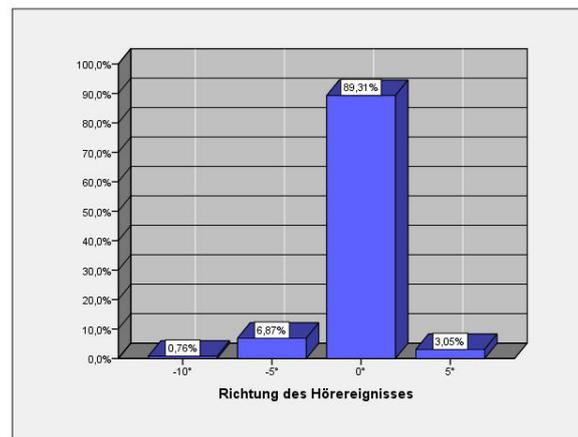


Abbildung A.5.: Richtung des Hörereignisses bei 0°-Schalleinfall über Lautsprecher

A.3. Lokalisation und Lokalisationsschärfe

A.3.1. Einfluss der Tonerfahrung auf das Lokalisationsvermögen der Probanden

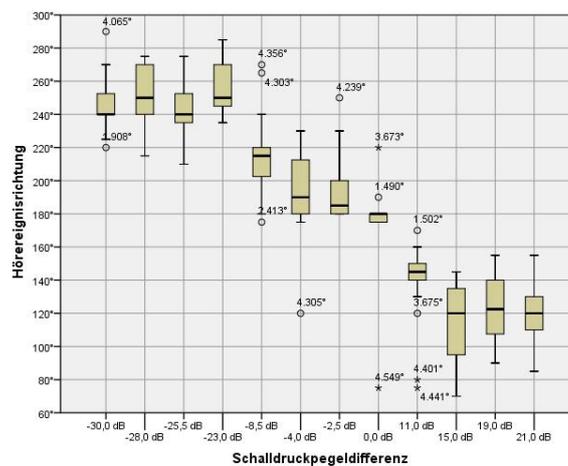


Abbildung A.6.: Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich

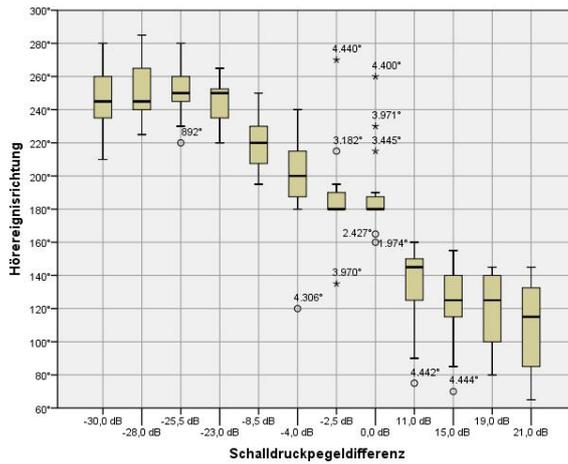


Abbildung A.7.: Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich

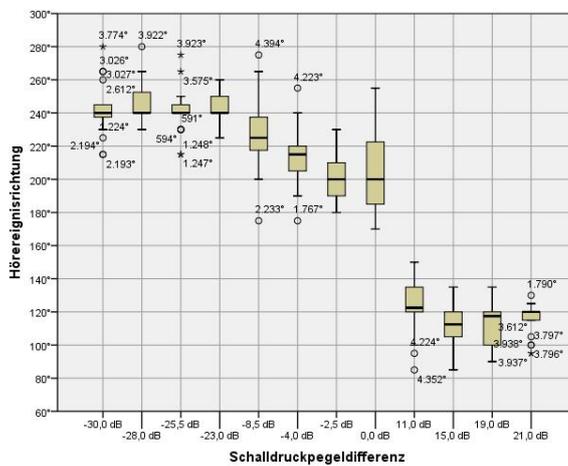


Abbildung A.8.: Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich

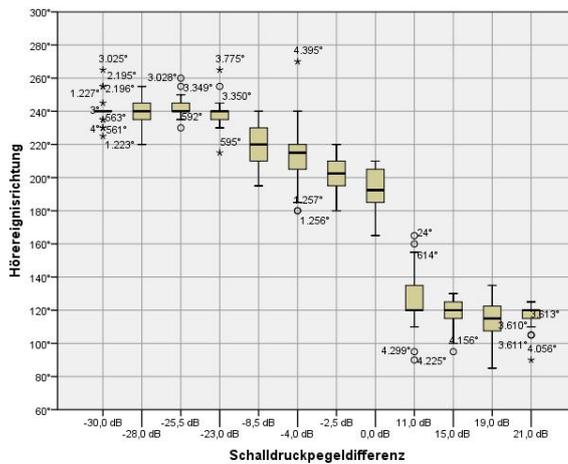


Abbildung A.9.: Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich

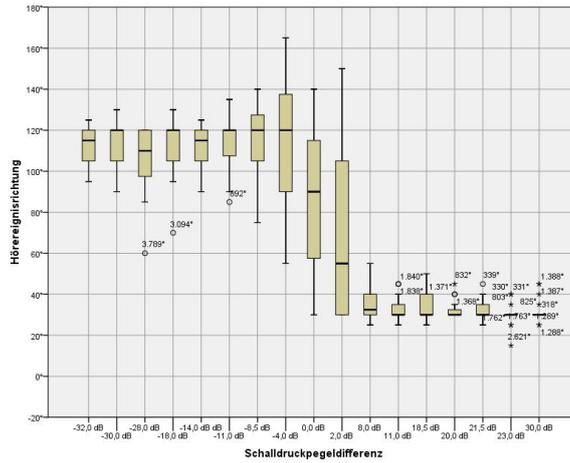


Abbildung A.10.: Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlicher Bereich

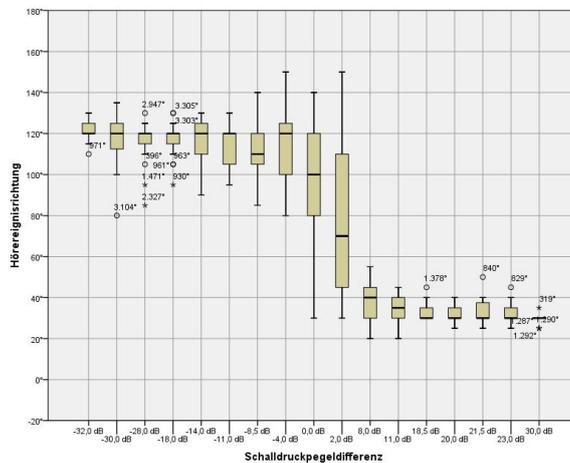


Abbildung A.11.: Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlicher Bereich

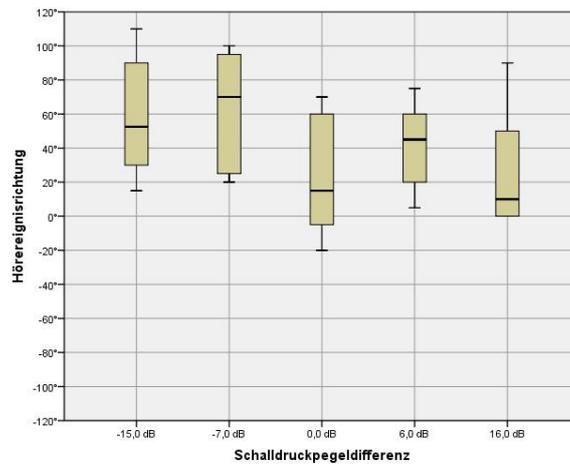


Abbildung A.12.: Lokalisation der Probanden ohne Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich

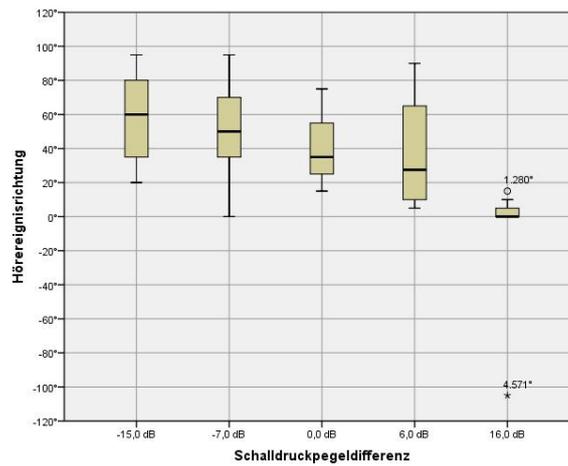


Abbildung A.13.: Lokalisation der Probanden mit Tonerfahrung bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich

A.3.2. Zusammenhang zw. empfundener und tatsächlicher Lokalisationsschärfe

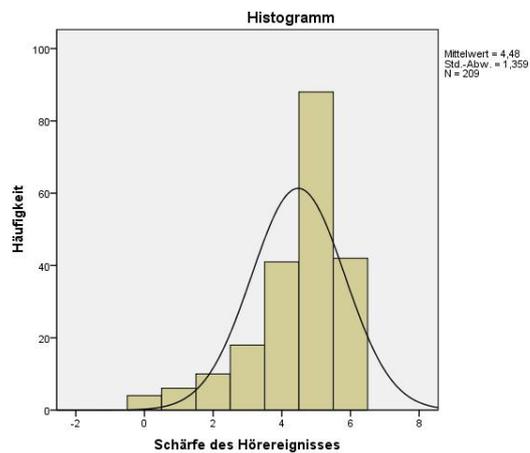


Abbildung A.14.: Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und vorderem Bereich

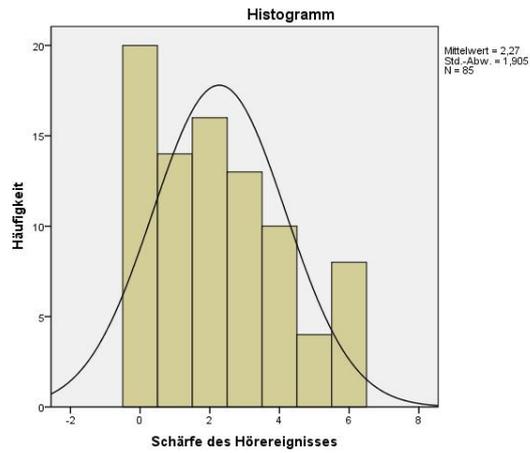


Abbildung A.15.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und vorderem Bereich

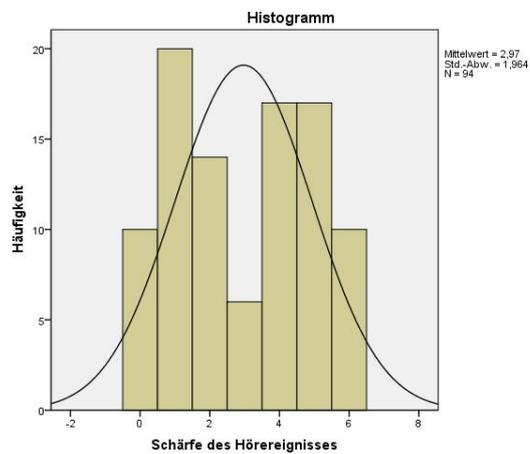


Abbildung A.16.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und vorderem Bereich

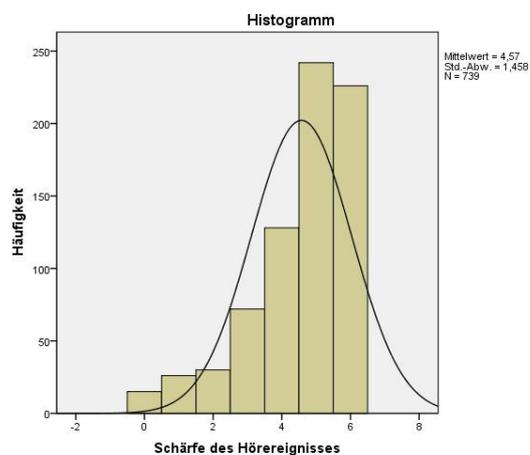


Abbildung A.17.: Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und seitlichem Bereich

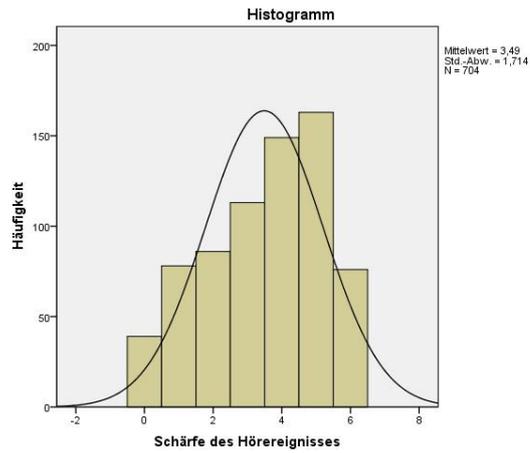


Abbildung A.18.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und seitlichem Bereich

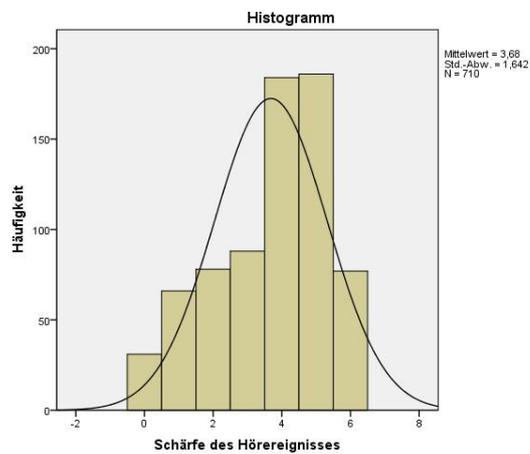


Abbildung A.19.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und seitlichem Bereich

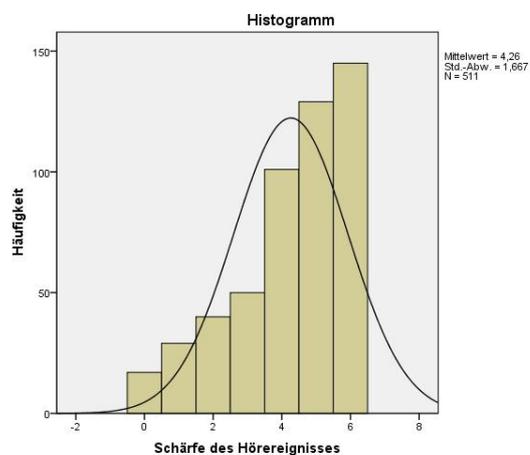


Abbildung A.20.: Histogramm der Schärfe bei Lautsprecher-Wiedergabe und hinterem Bereich

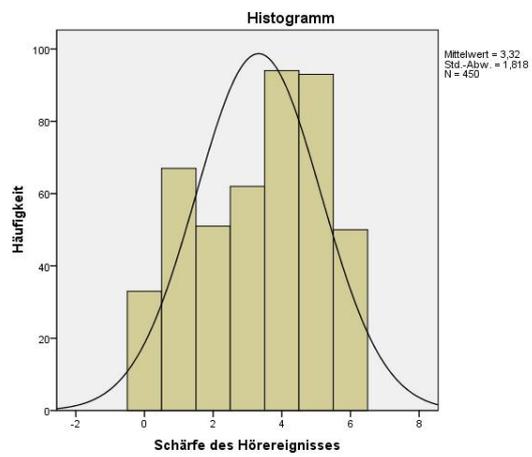


Abbildung A.21.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe ohne Headtracker und hinterem Bereich

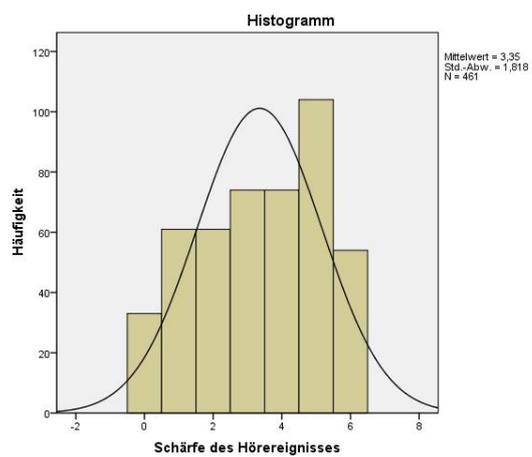


Abbildung A.22.: Histogramm der Schärfe bei Kopfhörer-Wiedergabe mit Headtracker und hinterem Bereich

A.3.3. Fehllokalisationen

A.3.3.1. Definition und Auftreten des Vorne-Hinten-Fehlers sowie des Links-Rechts-Fehlers

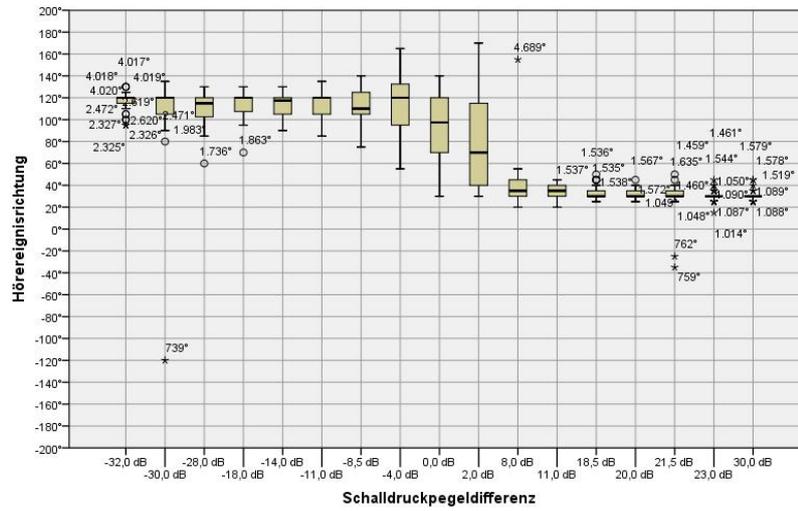


Abbildung A.23.: Boxplot für die Fehlerdefinition

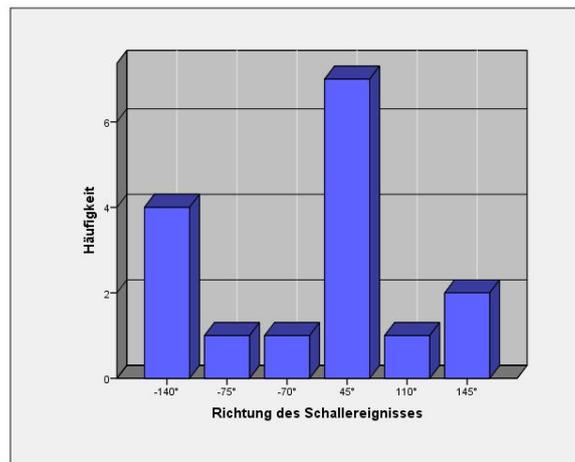


Abbildung A.24.: Verteilung des Links-Rechts-Fehlers