

Andreas Rotter, Andreas.Rotter@gmx.net

Exposé zur Magisterarbeit
Wahrnehmbarkeit des Unterschieds von Hochtonsystemen
unterschiedlicher Wirkprinzipien

Abstract

Ein bekanntes Phänomen bei der Beurteilung klanglicher Qualität von Lautsprechern ist die Diskrepanz zwischen subjektiver Präferenz und technischen Parametern. Lautsprecher mit scheinbar identischem Amplitudenfrequenzgang können zu sehr unterschiedlichen subjektiven Bewertungen führen. Als Unterschiedskriterien verbleiben Faktoren wie Zeitverhalten (Impulstreue), Belastbarkeit, Klirrverhalten sowie spezifische Interaktionen mit der gegebenen Raumakustik. Im tieffrequenten Bereich spielt zudem die Art und Abstimmung der Gehäusekonstruktion eine wesentliche Rolle. Liegen ähnliche Gehäusekonstruktionen und Tieftonchassis z.B. ein 2-Weg-Bassreflex-System vor, wird als Begründung der wahrgenommenen Unterschiede oft das physikalische Wirkprinzip des Hochtonlautsprechers genannt.

Durch Konstanthalten bzw. Ausschalten der o.g. physikalischen Unterschiede soll diese Behauptung empirisch untersucht werden. Dazu wird in eine Schallwand ein Tiefmitteltöner und jeweils einer von 6 Hochtönern mit unterschiedlichem physikalischem Antriebsprinzip bzw. Membranwerkstoff verbaut. Über ein modulares System soll ein einfacher Austausch der Hochtöner ermöglicht werden. Die Übergangsfrequenz zwischen Hoch- und Tiefmitteltöner soll für alle Kombinationen bei 2 kHz liegen, die Hochtonsysteme werden dementsprechend ausgewählt. Die dadurch entstehenden baugleichen 2-Wege-Systeme werden mittels FIR-Entzerrung durch einen DSP-Controller [Mül99] auf Achse perfekt in Amplituden- und Phasengang entzerrt. Die Konstruktion der Schallwand, der bündige Einbau des Tieftöners sowie das Wechselsystem für die bündig eingebauten Hochtonsysteme soll als Werkstattauftrag am ISTA koordiniert werden. Hörversuche anhand von dynamisch, d.h. den Kopfbewegung des Hörers folgende, zu auralisierender binauraler Aufnahmen der entzerrten Systeme im reflexionsarmen Raum (Stereo-Setup) sollen aufdecken, ob nach Ausschluss aller für wesentlich gehaltenen Unterscheidungsmerkmale der Lautsprecher wahrnehmbare Unterschiede tatsächlich existieren.

Sollten diese erfolgreich nachweisbar sein, können in einer weiterführenden Arbeit zunächst die Qualitäten der subjektiven Unterschiede ermittelt und anschließend deren physikalische Ursache gefunden werden.

Prüfer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl, EN 321, stefan.weinzierl@tu-berlin.de
Dr. Dipl.-Ing. Anselm Görtz, ITA Aachen, anselm.goertz@t-online.de
Betreuer: Alexander Lindau MA, EN 108, alexander.lindau@tu-berlin.de

1. Einleitung

Der Lautsprecher als Schallwandler ist seit seiner Entwicklung Gegenstand von subjektiven Evaluationen. Bei messtechnischen Untersuchungen bzw. bei Hörversuchen werden in der Regel die Lautsprecher als Summe ihrer Einzelsysteme, also Hoch-, Mitten- und Tieftöner sowie ihrer Gehäuse verglichen. Das charakteristischste Unterscheidungsmerkmal zwischen verschiedenen Fabrikaten ist der Amplitudenfrequenzgang, bei welchem sich Unterschiede sowohl messtechnisch als auch durch eine subjektive Evaluation eindeutig nachweisen lassen. Diese Unterschiede lassen sich schon bei Amplitudenverzerrungen mit geringer Güte feststellen, wobei Erhöhungen im Frequenzgang eher wahrnehmbar sind als Absenkungen. [Bue81][Tol88][Hie08]. Weitere Parameter, die messtechnisch belegt werden können und zu wahrnehmbaren Unterschieden führen können, sind das Impuls- und das Klirrvverhalten, die Richtcharakteristik und die Belastbarkeit der Lautsprecher. Bei der Evaluation von Lautsprechern im Stereoaufbau fließen zusätzlich subjektive Qualitäten wie Stereoabbildung sowie Tiefenstaffelung oder räumliches Auflösungsvermögen ein, die sich zwar als subjektiver Unterschied zwischen verschiedenen Lautsprecherpaaren benennen lassen, aber messtechnisch schwer belegbar sind. In diesem Fall ist eine genauere Betrachtung der eingangs genannten Einzelsysteme vonnöten.

In dem hier vorgestellten Versuch soll der Einfluss des physikalischen Wirkprinzips des Hochtönlautsprechers untersucht werden. Dafür wurden in Zusammenarbeit mit der Firma ADAM Audio 6 Hochtönlautsprecher ausgesucht: drei verschiedene Chassis auf Basis des elektrodynamischen Antriebs, ein Bändchenhochtöner, ein Lautsprecher mit magnetostatischen Antriebsprinzip und einer auf Basis eines Air-Motion-Transformer (AMT). Um bei dem Hörversuch die Wiedergabe des gesamten Frequenzspektrums sicherzustellen, wird zusätzlich ein elektrodynamischer 7“ Tiefmitteltöner verwendet, eine genauere Aufstellung der verwendeten Chassis findet sich im Abschnitt „Aufbau der Messumgebung“. Die Trennfrequenz wird für alle HT/TT-Kombinationen bei 2 kHz liegen, die Hochtönlautsprecher wurden alle dementsprechend ausgesucht.

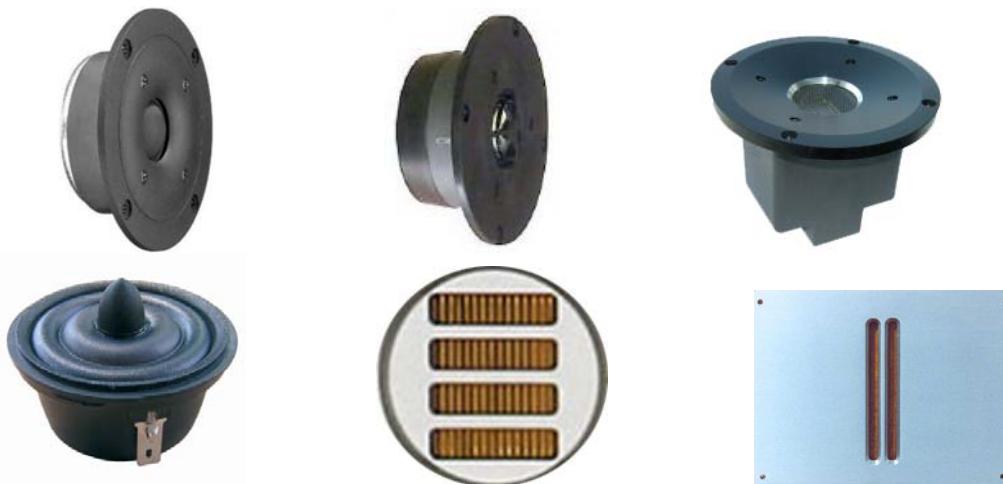


Abbildung 1: oben v.l.n.r.: elektrodyn. LS mit Gewebekalotte, - mit Aluminiumkalotte, Bändchenhochtöner
unten v.l.n.r.: elektrodyn. Ringstrahler, X-ART Hochtöner, magnetostatischer Hochtönlautsprecher

Alle Hochtöner werden in Kombination mit dem Tiefmitteltöner in einer Schallwand verbaut. Der schnelle Umbau der Hochtöner wird durch Wechselsystem sichergestellt, näheres zu den Dimensionen der Schallwand und die Positionierung der LS findet sich im Abschnitt Aufbau. Das zu untersuchende Gesamtsystem soll auf den Freiheitsgrad Hochtönlautsprecher beschränkt werden. Der Gesamtfrequenz und -phasengang der Lautsprecherkombination wird im Vorfeld mit dem HD-2 Controller [Mül99] kompensiert. Eine genauere Beschreibung des Verfahrens findet sich im Abschnitt Entzerrung. Auf weitere Freiheitsgrade, zum Beispiel den

eines einheitlichen Lautsprechergehäuses für alle Hoch-/Tieftönerkombinationen, wurde verzichtet, da es an diesem durch die unterschiedlich großen Hochtönlautsprecher zu spezifischen Gehäusereflexionen kommen kann. Die Abmessungen sind dem Bauplan der Schallwand im Anhang zu entnehmen.

Mit Hilfe des am Fachgebiet Audiokommunikation entwickelten binauralen Messsystems FABIAN [Lin06] werden im reflexionsarmen Raum (RAR) des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik (ISTA) der TU Berlin binaurale Impulsantworten der entzerrten Lautsprecherkombinationen in der Schallwand für Kopfbewegungen in der horizontalen Ebene aufgenommen. Um ein Stereosetup für den Hörversuch zu erhalten, werden die IA der Lautsprecher in der Schallwand jeweils einmal in der Position des linken LS und einmal in der Position des rechten LS aufgezeichnet. Näheres dazu im Abschnitt Messaufbau. Die somit entstehenden Datensätze können in einer binauralen Simulationsumgebung, zum Beispiel der am Fachgebiet Audiokommunikation entwickelten Software fWONDER [Lin07] mit beliebigen Audioinhalten und in beliebiger Reihenfolge auralisiert werden.

Die Darbietung des Materials erfolgt über einen elektrostatischen Kopfhörer vom Typ STAX SR 202. Da auch dieser einen charakteristischen Amplitudenfrequenzgang hat, welcher die Beurteilung des Musikmaterials und damit der IA der Lautsprecher verzerren kann, wird auf eine aktuelle Magisterarbeit zurückgegriffen, die sich mit der Entzerrung von Kopfhörerfrequenzgängen beschäftigt hat [Schä08], und aus dieser ein optimales Entzerrungsverfahren gewählt.

Der anschließend durchgeführte Hörversuch soll klären, ob es hörbare Unterschiede zwischen den verschiedenen Lautsprechertypen gibt. Da es zuerst um die grundlegende Frage des hörbaren Unterschieds zwischen zwei verschiedenen Hochtönern geht, wird der Versuch in Form eines ABX-Blindtests durchgeführt, als Variante eines Forced-Choice-Verfahrens. Dabei werden der Versuchsperson Musikmaterial über zwei verschiedene Hochtöner A und B sowie über einen, zufällig mit A oder B identischen Hochtöner X, dargeboten. Die VP muss nun aufgrund der Ähnlichkeit der dritten Probe entscheiden, ob Hochtöner X gleich Hochtöner A oder Hochtöner B ist. Eine weitere Erläuterung des Verfahrens findet sich im Abschnitt Hörversuch. Durch die vorherige Entzerrung wird das gängigste subjektive Erkennungsindiz, der Frequenzgang, als Unterscheidungskriterium ausgeschaltet. Die Verwendung eines Stereo-Setups für den Versuch ermöglicht den Probanden auch die Beurteilung nicht objektiv messbarer Parameter wie der Tiefenstaffelung und der Abbildung im Raum. Das Ergebnis wird Aufschluss über die Hörbarkeit der Unterschiede zwischen den verschiedenen Lautsprechern geben.

2. Stand der Forschung

Bei der subjektiven Evaluation von Lautsprechern durch Hörtests bestand lange das Problem im nicht einheitlichen Aufbau der Versuchsumgebung [Too82], welcher an der Validität der Hörtests Zweifel übrig ließ. Der direkte Vergleich verschiedener Lautsprecher wurde durch die Tatsache erschwert, dass die Platzierung eines LS einen genauso fundamentalen Einfluss auf den subjektiven Höreindruck hat, wie der LS als Gesamtsystem selber [Bec93][Oli94]. Im Zuge dieser Untersuchungen fand man heraus, dass die Erfahrungen bzw. das Hörvermögen der Versuchspersonen ebenfalls eine Rolle bei der subjektiven Beurteilung von Lautsprechern spielten [Too85][Oli03]. Personen mit einem überdurchschnittlichen Hörvermögen sind in der Lage, in Hörversuchen wesentlich genauere Urteile abzugeben, als jene mit durchschnittlichen oder eingeschränkten Hörvermögen. Personen mit umfangreicher Erfahrung in der Beurteilung von Schallereignissen können zudem wesentlich reproduzierbare Urteile abgeben, als jene mit wenig Erfahrung. Mit der Einführung der Binauraltechnik in die Lautsprecherevaluation und der damit möglichen Virtualisierung von

Hörversuchen [Too91][Hie08] wurde es möglich, Versuchsteilnehmern ohne großen Aufwand den direkten Vergleich von Lautsprechern zu ermöglichen. Eine Empfehlung zur Gestaltung der Versuchsumgebung für die Lautsprecherevaluation wurde 1996 von der Audio Engineering Society veröffentlicht [AES96].

Im Jahr 2006 wurden im Rahmen eines Vergleichstest von Studiomonitoren mit bis zu 40 l Volumen auch binaurale Messungen an diesen durchgeführt, mit deren Hilfe Parameter wie die räumliche Abbildungsleistung von einer oder mehreren Quellen messtechnisch erfasst werden sollten [Goe06][Mar06]. Um den Test realitätsnah zu gestalten, wurde die Versuchsumgebung einem Tonstudio nachempfunden, d.h. die verschiedenen LS standen u.a. auf einem Pult und der Kunstkopf wurde an der Spitze des Stereodreiecks, das die Abhörposition und die zwei LS bildeten, platziert. In Kombination mit weiteren Messdaten der Lautsprecher (Freifeldmessung LS und Kunstkopf, Messung mit Mikrofon in der Mitte des Kunstkopfs, Grenzflächenmessung auf dem Pult) konnte in der kopfbezogenen Übertragungsfunktion (HRTF) verschiedene Faktoren der Versuchsumgebung, wie die Elevation der Hochtöner oder der Pulttisch, als Schallfeldeinfluss ausgemacht werden. Hörversuche anhand der verschiedenen Messaufbauten zeigten zudem, dass das wichtigste Unterscheidungskriterium bei achsenentzerrten LS der Frequenzgang am Trommelfell des Hörers ist und das bei der Verwendung eines Kunstkopfes statt eines Mikrofons durch Reflexionen an Kopf und Torso deutlich mehr wellengeometrische Informationen gesammelt werden können.

In allen Versuchen wurden die Lautsprecher immer als Gesamtsystem verglichen, ob nun in Zusammenwirkung mit dem Raum oder bei so genannten Präferenz-Ratings, welche zu einer Ordnung verschiedener LS nach persönlicher Bevorzugung führen. Wie eingangs erwähnt besteht der LS aber aus verschiedenen Teilsystemen, wie Hoch-, Mitten- und Tieftönern sowie dem Gehäuse, welches in diversen Varianten auftauchen kann (geschlossen, Bassreflex, Transmissionslinie). An dem Punkt der Untersuchung eines dieser Einzelsysteme, dem des Hochtöners, setzt die folgende Arbeit ein.

3. Methodik

3.1 Aufbau der Messumgebung

Bei den ausgewählten Hochtönern handelt es sich um Modelle, wie sie im HiFi-Bereich und bei Studiomonitoren zum Einsatz kommen. Alle Lautsprecher wurden in Zusammenarbeit mit ADAM Audio GmbH, Berlin ausgesucht und freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Drei der Hochtöner arbeiten auf Basis des elektro-dynamischen Antriebsprinzips, wobei ein Chassis mit einer Aluminiumkalotte (Vifa D25) ist und ein Chassis mit einer Gewebekalotte (Seas Excel T25) ausgestattet ist. Das dritte Chassis ist als Ringstrahler (Vifa XT25) ausgeführt. Ein HT basiert auf dem Bändchenprinzip (Expoliner ARL 90 TWIN), ein weiterer auf dem magnetostatischen Antriebsprinzip (Expoliner RT7-Pro). Das 6. Chassis ist die Hochtönervariante des bei ADAM eingesetzten Modells des Air-Motion-Transformer (X-ART Hochtöner), dessen physikalisches Antriebsprinzip von Oskar Heil entwickelt und 1972 patentiert wurde [Hei72]. Da alle Hochtöner ab einer Frequenz von 2 kHz untersucht werden sollen, wird zur Wiedergabe des unteren und mittleren Frequenzspektrums ein 7“ großer Tiefmitteltöner verwendet (Eton 5-880/25 HEX).

Alle Hochtöner werden in Kombination mit dem Tiefmitteltöner in einer Schallwand von 1 m Breite und 2 m Höhe (Material: MDF) verbaut, womit deren Größe für den Wellenlängenbereich der Hochtöner als unendlich angesehen werden kann. Zusätzlich werden die Kanten abgerundet bzw. mit Schaumstoff gedämpft. So sollen Interaktionen der HT mit der Schallwand unterdrückt werden. Das geometrische Zentrum und die Position in der Schallwand ist für alle HT gleich, was durch ein Wechselsystem sichergestellt werden soll. So soll auch der bündige Einbau der HT in die Schallwand sowie der unkomplizierte Wechsel

dieser ermöglicht werden. Der Tiefmitteltöner wird ebenfalls bündig in die Schallwand eingebaut. Der bündige Einbau soll Interaktionen der LS-Kombinationen mit der Schallwandoberfläche verhindern.

3.2 Entzerrung der Lautsprechersysteme

Der Entzerrung der Hochtöner geht eine Messung unter Freifeldbedingungen derselben voraus. Auch der Tiefmitteltöner wird diesen Messungen unterzogen, da die spätere Entzerrung sich auf die Kombination aus Hoch- und Tieftöner bezieht. Hier wie auch bei den späteren Kunstkopfmessungen wird in einer Fernfeldposition zur Schallwand gemessen. Eine Messentfernung von 3 m garantiert sowohl Fernfeldbedingungen im relevanten Frequenzbereich als auch eine als typisch zu bezeichnende Abhörsituation [DIN08].

Als Messmikrofon für die on-axis Frequenzgänge der einzelnen Chassis wird ein ¼ Zoll Freifelddruckempfänger Typ Bruel & Kjaer 4135 mit Vorverstärker B&K 2610 verwendet. Dessen Betragsfrequenzgang ist laut Hersteller im Bereich von 10 Hz bis 30 kHz linear, womit sichergestellt ist, dass durch dieses Mikrofon keine Verzerrung der zu messenden Lautsprecherfrequenzgänge erfolgt. Für die Kunstkopfmessungen werden die in selbigem eingebauten elektrostatischen Kleinmembranmikrofone Typ DPA 4060 verwendet. Die durch diese Mikrofone entstehenden Verzerrungen oberhalb von 1kHz können mit Filtern, die vor dem Einbau der Mikrofone in den Kunstkopf von selbigen erstellt wurden, kompensiert werden [Lin06].

Nach [Mös05, S.85] muss der Abstand Mikrofon-Schallwand (3m) wesentlich größer als die Größe der größten Membran (15,7 cm) sein, was sicherstellt, dass alle Punkte auf der Membran denselben Abstand zum Mikrofon haben. Zweitens muss der Mikrofon-Lautsprecher Abstand auch wesentlich größer als die größte, im Fokus stehende Wellenlänge von 0,17 m (bei 2kHz, der Trennfrequenz zw. HT und TT), sein, was sicher stellt, dass das Schallfeld am Mikrofon annähernd dem einer ebenen fortschreitenden Welle entspricht. Als drittes muss das Verhältnis vom Abstand Kunstkopf-LS zur Membrangröße wesentlich größer sein als das Verhältnis von Membrangröße zur größten Wellenlänge, um Phasenfehler größer als $\pi/4$ zwischen als Teilstrahlern agierenden Bereichen des Lautsprechers zu vermeiden und damit eine abstandsunabhängige Richtcharakteristik zu garantieren. Das Einsetzen der Größen führt zu einem Verhältnis von 19,1 (Abstand Wand-Kopf/Länge der gr. Membran) zu 0,94 (Länge der gr. Membran/größte Wellenlänge), womit auch das dritte Fernfeldkriterium erfüllt wäre.

Um zu verhindern, dass raumakustische Phänomene den Amplitudenfrequenzgang verzerren, werden die Messungen im RAR des ISTA mit „EASERA“ bzw. „Monkey Forrest“ (MF) durchgeführt. In dieser Umgebung werden alle Interaktionen mit der Raumgeometrie oberhalb von 63 Hz (untere Grenzfrequenz des RAR) sowie alle richtungsbezogenen Wirkungen der Treiber ausgeschaltet. Folgende Parameter werden gemessen: Impedanzkurve HT, Impedanzkurve TT, Nahfeldfrequenzgang des TT, Fernfeldfrequenzgang des TT, Fernfeldfrequenzgang des HT, Klirrfaktor TT, Klirrfaktor HT. Die Fernfeldmessungen werden dabei den Bezugspegel und den Phasengang bei der Entzerrung vorgeben.

Mit den gemessenen Daten werden zuerst die geplanten spektralen Arbeitsbereiche der HT und des TT geprüft. Im Anschluss werden in „Monkey Forrest“ (MF) Koeffizienten für FIR-Filter entworfen, welche dann auf den HD-2 Controller übertragen werden. Die Koeffizienten werden dabei auf eine Bandbreite von 24 kHz ausgelegt, als Abtastrate wird 48 kHz gewählt.

3.3 Möglichkeiten und Grenzen der Amplitudenentzerrung

Ziel der Entzerrung soll ein absolut frequenzgangs- und phasenlineares Gesamtsystem von Hochtöner und Tieftöner sein. Auf der Achse Hochtöner-Ohr sollen zwischen 50 Hz und 20

kHz alle Amplitudenschwankungen unter einer Hörbarkeitsschwelle von $\pm 0,5$ dB liegen [Mül99]. Aus den komplexen Frequenzgangsspektren der Teillautsprecher können inverse FIR-Filter berechnet werden, deren Koeffizienten der HD2-Controller dann zur Entzerrung verwendet. Bei einer Abtastrate von 48 kHz kann der HD-2 maximal 1000 Filterkoeffizienten pro Kanal verarbeiten. Durch eine spezielle Multiratenverarbeitung wird die Effizienz der beschränkten FIR-Filter jedoch deutlich erhöht. Verschiedene Untersuchungen am ITA Aachen [Lec92][Mül99] zeigen, dass damit ein sehr selektiver Eingriff in den Hoch- und Mitteltonbereich möglich ist, der Betragsfrequenzgang der Lautsprecher wird vollständig linear entzerrt. Durch das relativ lange Ausschwingverhalten von Tieftonlautsprechern wird die Entzerrung im Tieftonbereich allerdings laufzeitbehaftet; die FIR-Filter müssen für eine konstante Gruppenlaufzeit frequenzabhängige Vorverzögerungen realisieren. Für eine exakte Bestimmung des Frequenzgangs des Tieftöners muss sowohl eine Nahfeldmessung vor der Tieftonmembran als auch eine Fernfeldmessung verwendet werden. Grund für die Nahfeldmessungen im tieffrequenten Bereich ist die untere Grenzfrequenz des RAR von 63 Hz, ab welcher sich mehr oder minder starke Raummoden ausbilden. Die Frequenzgänge aus Nah- und Fernfeldmessung werden dann miteinander „verklebt“, wobei hier Diskontinuitäten zu vermeiden sind [Mül99]. Die Frequenzgänge der Hochtöner können aus einfachen Fernfeldmessungen gewonnen werden.

3.3 Messaufbau für die binaurale Simulation

Die binauralen Impulsantworten für den Hörversuch werden mit dem am Fachgebiet Audiokommunikation entwickelten Messsystem FABIAN aufgenommen. Hier handelt es sich um einen HATS (head and torso simulator) mit integrierten Mikrofonen an der Stelle des Eingangs zum Gehörgang und der Besonderheit eines automatisierbaren Halsgelenkes, welches horizontale, vertikale und sogar laterale Kopfbewegungen ermöglicht.

Um Paartoleranzen zwischen verschiedenen Lautsprechern gleichen Fabrikats zu vermeiden, kommt als linker und rechter LS jeweils die gleiche Schallwand zum Einsatz. Die binauralen Impulsantworten des linken und des rechten Lautsprechers werden für das im Hörversuch angestrebte Stereo-Setups nacheinander aufgezeichnet. Die Schallwand wird dabei erst am linken Punkt, dann am rechten Punkt eines gleichseitigen Dreiecks mit Kantenlänge 3 m positioniert, an dessen Spitze sich der Kunstkopf befindet. Die Abstände sind entsprechend der DIN 15996 gewählt, einer Norm zur Einrichtung von Bild- und Tonschnittplätzen [Wei08, S.611][DIN08].

Die Vermessung der binauralen Impulsantworten wird im horizontalen Bereich zwischen $\pm 80^\circ$ im Abstand von 1° Schritten erfolgen, was in 161 Messungen pro Kanal resultieren wird. Insgesamt ergeben sich für die sechs zu untersuchenden Hochtöner 6×2 Kanäle \times 161 Messwerte pro Kanal = 1932 Impulsantworten. Der identische Aufbau der Messumgebung garantiert eine identische Vermessung zunächst der linken Seite mit allen vorentzerrten LS-Kombinationen, sowie nach dem Umbau, die der 6 zweiten Quellpositionen. Um im Hörversuch eine Stereodarbietung zu erhalten, werden beide Quellen zeitgleich auralisiert.

Zusätzlich zu den kopfbezogenen Impulsantworten werden zu Verifikationszwecken auch die Freifeldübertragungsfunktionen der Lautsprechersysteme an der mittleren Position des Kunstkopfes aufgenommen.

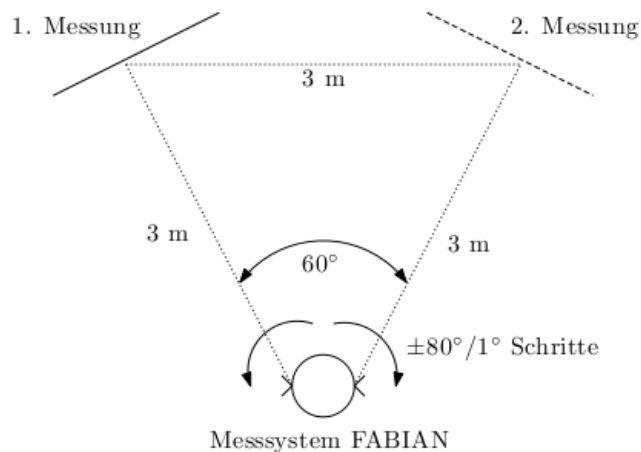


Abbildung 2: Standort Schallwand bei Messung der binauralen Impulsantworten

4. Hörversuch

Wie in der Einleitung erwähnt, werden auch die für den Hörversuch verwendeten Kopfhörer Modell STAX entzerrt, das heißt, das dargebotene Musikmaterial wird sowohl mit den Impulsantworten des linken und rechten Lautsprechersystems als auch mit den inversen Amplitudenfrequenzgängen des Kopfhörers gefaltet. Das binaurale Audiosignal wird den Probanden dann interaktiv, also den Kopfbewegungen folgend, dargeboten.

Der Hörversuch innerhalb dieser Arbeit soll zunächst klären, ob überhaupt hörbare Unterschiede zwischen den Hochtönlautsprechern existieren. Dazu wird ein ABX-Blindtest verwendet werden, eine Variante des Forced-Choice-Verfahrens. Forced-Choice meint, dass durch die Darbietung von mehreren Reizen eine Entscheidung der Versuchsperson erzwungen wird, womit eine Minimierung der Antwortneigung der Versuchsperson erreicht wird. Im Fall des ABX-Tests handelt es sich um zwei unterschiedliche Reize A und B, ergänzt um einen dritten Reiz X, der per Zufall Reiz A oder Reiz B entspricht. Ziel der Versuchsperson wird sein, den dritten Reiz X den beiden zuvor gehörten Reizen A und B zuzuordnen. Bei den Reizen handelt es sich um Musikmaterial, welches mit den binauralen Impulsantworten der LS-Kombination gefaltet wurde. Insgesamt gibt es bei 6 Lautsprechern 15 Testpaare zu bewerten. Da die zu erwartenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Hochtönern aufgrund des Ausschaltens wichtiger Parameter sehr gering sein werden, braucht es entweder eine große Anzahl an Versuchspersonen oder eine große Anzahl an Wiederholungen pro Versuchsperson, wobei Clarke die Anzahl der Wiederholungen pro Reizpaar auf 12-16 und Maempel auf 15-20 pro Stimuluspaar ansetzt [Cla82][Mae07].

Um die Versuchsdauer zeitlich zu beschränken (180-300 Trials je VP), ist ein Abbruchkriterium erforderlich. So kann die, parallel aus dem laufenden Trial ermittelte, statistische Signifikanz aus der Anzahl der Treffer und der Anzahl der Trials bezogen auf ein Hochtönerpaar Aufschluss darüber geben, ob die Versuchsperson nur rät oder den Unterschied zwischen den Stimuli tatsächlich wahrnimmt [Mae07].

Sollten sich zwischen allen oder auch nur zwischen einzelnen Lautsprecherpaaren signifikante Unterschiede nachweisen lassen, würde sich dem ersten Durchgang ein Zweiter anschließen, um eine subjektiv-qualitative Bewertung der wahrgenommenen Unterschiede durchzuführen. Die Verifikation der physikalischen Unterschiede Merkmale würde sich dann ebenfalls auf diese, perzeptiv als unterschiedlich bewerteten, Lautsprecherkombinationen beziehen. Die subjektiv relevanten Attribute könnte in einem Repertory-Grid-Versuch aufgedeckt werden, welche dann in einem anschließenden Rating als semantisches Differential dienen würden, um die Unterschiede in den Darbietungen mit verschiedenen Hochtönern quantitativ zu

erfassen. Auch könnte in Paarvergleichen der LS-Systeme Rangfolgen bzgl. bestimmter Unterschiedsattribute oder der Präferenz dieser erstellt werden.

4. Arbeitsplan

Arbeitspunkt	Zeitraum
Beschaffung Lautsprecher	komplett
Aufbau Schallwand und Wechselsystem f. LS	bis Anfang März
Messung LS-Parameter	März 2009
On-Axis Entzerrung für HD-2 generieren, validieren	März 2009
Durchführung Binaural-/Freifeldmessungen d. LS	April 2009
Erstellung ABX-Versuch	Mai 2009
Durchführung interakt. Vor- und Hauptversuch (10 VP)	Mai 2009
Auswertung Hörversuch	Mai 2009
schriftl. Ausführung	Juni-Juli 2009

5. Literatur

- [Bec93] Bech, Soeren: "The influence of the room and of loudspeaker position on the timbre of reproduced sound in domestic rooms". In: 12th Int. AES Conference, Kopenhagen, 1993. Paper 12-007
- [Bue81] Bücklein, Roland: "The audibility of frequency response irregularities". In: J. Audio Eng. Soc. Vol. 29 (3), 1981. S.126-131
- [Cla82] Clarke, David: "High-Resolution subjective testing using a Double-Blind Comparator". In: J. Audio Eng. Soc. Vol. 30 (5), 1982. S. 330-338
- [Goe90] Goertz, Anselm: „Entwicklung eines Signalprozessors zur Entzerrung von Lautsprechern“. Dipl.-Arb. Aachen: Rhein.-Westf. Techn. Hochs., 1990.
- [Goe06] Goertz, Anselm: „Vergleich der messtechnischen Parameter von Studiomonitoren mit den Bewertungen bei Hörtests“. In: 24. Tonmeistertagung, Leipzig, 2006, Proceedings
- [Hei72] Heil, Oskar: "Acoustical transducer with a diaphragm forming a plurality of adjacent narrow air spaces". In: US Patent 3.636.278, San Mateo (CA), USA, 1972.
- [Hie08] Hiekkänen, T. et al: "Virtualized Tests for Loudspeakers". In: 124th AES Convention, Amsterdam, 2008. Preprint 7367
- [Lec92] Leckschat, Dieter: „Verbesserung der Wiedergabequalität von Lautsprechern mit Hilfe von Digitalfiltern“. Dissert. Aachen: Rhein.-Westf. Techn. Hochs., 1992.
- [Lin06] Lindau, A.: „Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Impulsantworten in mehreren Freiheitsgraden“. Mag.-Arb. Berlin: Techn. Univ., 2006.
- [Lin07] Lindau, Alexander: "Binaural resynthesis for comparative studies of acoustical environments". In: 122nd AES Convention, Wien, 2007. Preprint 7032
- [Mae07] Maempel, Hans-Joachim: „Perzeptive Messung und Evaluation“. In: Skript zum Labor „Kommunikationstechnologie“. Berlin: Techn. Univ., 2007.
- [Mar06] Makarski, Michael: „Können binaurale Messungen den Klangunterschied zwischen Studiomonitoren quantitativ erfassen“. In: 24. Tonmeistertagung, Leipzig, 2006. Proceedings

- [Mös05] Möser, Michael: *Technische Akustik*. 6., erw. u. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer, 2005.
- [Mül99] Müller, Sven: „Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher“. Dissert. Aachen: Rhein.-Westf. Techn. Hochs., 1999.
- [Oli94] Olive, Sean E.: “The effects of loudspeaker placement on listener preference rating”. In: J. Audio Eng. Soc. Vol. 42 (9), 1994. S.651-669
- [Oli03] Olive, Sean E.: “Differences in performance and preference of trained vs. untrained list. in loudspeaker tests: A case study”. In: 114th AES Convention, Amsterdam, 2003. Preprint 5728
- [Schä08] Schärer, Zora: „Kompensation von Frequenzgängen im Kontext der Binauraltechnik“. Mag.-Arb. Berlin: Techn. Univ., 2008.
- [Too82] Toole, Floyd E.: “Listening Tests – Turning Opinion into Fact”. In: J. Audio Eng. Soc. Vol. (6), 1982. S.431-445
- [Too85] Toole, Floyd E.: “Subjective measurements of loudspeaker sound quality and listener performance”. In: J. Audio Eng. Soc. Vol. 33 (1/2), 1985. S.2-32
- [Tol88] Toole, Floyd E. and Olive, Sean E.: “The modification of timbre by resonances: Perception and measurement”. In: J. Audio Eng. Soc. Vol. 36 (3), 1988. S.122-142
- [Too91] Toole, Floyd E.: “Binaural record/reproduction systems and their use in psycho-acoustic investigation”. In: 91st AES Convention, New York, 1991. Preprint 3179
- [Wei08] Slavik, Karl M. und Weinzierl, Stefan: „Wiedergabeverfahren“. In: Stefan Weinzierl (Hg.) *Handbuch der Audiotechnik*. 1. Auflage Berlin et al.: Springer, 2008.

Normen und Empfehlungen

- [AES96] AES recommended practice for professional audio: “Subjective evaluation of loudspeakers”. New York, 1996
- [DIN08] DIN 15996: „Bild- und Tonbearbeitung in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben - Grundsätze und Festlegungen für den Arbeitsplatz“. Berlin, 2008