Technische Universität Berlin

Fakultät I

Institut für Sprache und Kommunikation

Fachgebiet Audiokommunikation

Audiovisuelle Qualitätsbewertung von Lautsprechern

Magisterarbeit

vorgelegt von

Paul Mainz

[redacted]

Berlin, 18. März 2015

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Zweitgutachter: Dr. Hans-Joachim Maempel

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, den 18. März 2015

Paul Mainz

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand der Forschung **3**

2.1 Multimodale Wahrnehmung 3

2.2 Audiovisuelle Wahrnehmung 4

2.2.1 Audiovisuelle Qualitätsbewertung 7

2.2.2 Audiovisuelle Wahrnehmung von Lautsprechern 9

3 Hörversuch **11**

3.1 Untersuchungsgegenstand 11

3.2 Versuchsdesign 12

3.2.1 Kopräsenz-Paradigma 12

3.2.2 Konfliktreiz-Paradigma 12

3.3 Lautsprecher 14

3.4 Struktureller Versuchsaufbau 17

3.5 Messung 19

3.6 Audioinhalt 23

3.7 Erhebungsinstrument 24

3.8 Skalenkonstruktion 25

3.9 Technischer Versuchsaufbau 29

3.9.1 Datenerfassung 29

3.9.2 Akustische Simulation 32

3.9.3 Drehteller 35

3.10 Durchführung 36

4 Auswertung **39**

4.1 Kopräsenz-Paradigma 41

4.1.1 Auditive Attribute 44

4.1.2 Visuelle Attribute 49

4.1.3 Audiovisuelle Attribute 50
4.2 Konfliktreiz-Paradigma 52
4.2.1 Auditive Attribute 53
4.2.2 Visuelle Attribute 57
4.2.3 Audiovisuelle Attribute 58
4.3 Zusammenhänge von Variablen 60
4.3.1 Kopräsenz-Paradigma 60
4.3.2 Konfliktreiz-Paradigma 65

5 Zusammenfassung **70**

Literaturverzeichnis **73**

Abbildungsverzeichnis **76**

Tabellenverzeichnis **79**

A Varianzanalysen **82**
A.1 Kopräsenz-Paradigma 82
A.2 Konfliktreiz-Paradigma 85

B Regression **89**
B.1 Kopräsenz-Paradigma 89
B.2 Konfliktreiz 91

C Polaritätsprofile **93**
C.1 Kopräsenz-Paradigma 93

D LimeSurvey **97**
D.1 Versuchsanweisungen 97
D.2 Fragebögen 98
D.3 osc-web 99

E Matlab-Funktionen **100**
E.1 reset_turntable.m 100
E.2 move_turntable.m 102
E.3 setup_rightTable.m 105
E.4 outline_callback.m 106

1 Einleitung

„Das klingt aber hell." Nicht selten knüpfen wir logische Verbindungen zwischen Dingen, die wir sehen, und welchen, die wir hören. Dies geschieht nicht nur in der Sprache. Auch unser Wahrnehmungskomplex verarbeitet Reize der unterschiedlichen Sinne und bringt sie in Zusammenhang. Im Alltag, nahezu wann immer wir etwas wahrnehmen, ist nicht nur einer unserer Sinne an dieser Wahrnehmung beteiligt. So wirken in fast jeder Situation, in der wir Klänge hören, nicht nur akustische, sondern auch optische Ereignisse auf uns ein und bewirken auditive und visuelle Reize. Auch diese visuellen Reize gehören – seien sie verursacht von der Schallquelle selbst oder von irgendwelchen anderen Objekten – zu der Charakteristik einer speziellen Hörsituation dazu und können die Wahrnehmung einer Schallquelle beeinflussen. Überträgt man diesen Gedanken auf einen Lautsprecher als Quelle, so liegt die Vermutung nahe, dass auch das Aussehen dieses Lautsprechers die gesamte Wahrnehmung verändern kann. Zweifellos sind die akustischen Eigenschaften wie beispielsweise der Frequenzgang, das Maß an nichtlinearen Verzerrungen oder das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers sehr wichtige, vielleicht auch die wichtigsten Kriterien, wenn es um die qualitative Bewertung eines Lautsprechers geht. Schließlich ist dieser ja auch dazu da, akustische Signale wiederzugeben. Aus der Forschung über audiovisuelle Wahrnehmung – also der gleichzeitigen Wahrnehmung über die Sinneskanäle Hören und Sehen – sind jedoch bereits Phänomene bekannt, bei denen das Sehen einer Schallquelle, auch wenn es deren primärer Zweck ist, akustische Information zu überliefern, spürbaren Einfluss auf die gesamte Wahrnehmung hat. Da ein Lautsprecher als letztes Glied in der Audioübertragungskette die Komponente ist, die ein Hörer oftmals auch zu sehen bekommt, erscheint es sinnvoll, zu untersuchen, ob auch im Falle der Lautsprecherwiedergabe audiovisuelle Wahrnehmungseffekte vorhanden sind.
Diese Arbeit betrachtet die audiovisuelle Wahrnehmung von Lautsprechern als Schallquelle und die qualitative Bewertung jener Lautsprecher durch einen Hörer. Mithilfe einer empirischen Untersuchung soll herausgefunden werden, ob die optischen Eigenschaften verschiedener Lautsprecherboxen eine Auswirkung auf die

Wahrnehmung des durch sie wiedergegebenen Klanges sowie auf die Qualitätsbewertung des gesamten Produktes Lautsprecher haben. Findet sich hier ein Zusammenhang, so soll versucht werden, diesen zu quantifizieren
Audiovisuelle Wahrnehmung als wissenschaftliches Forschungsfeld wird heute zwar mit immer größerer Aufmerksamkeit bedacht, dennoch handelt es sich hierbei um eine junge Disziplin, die viele offene Fragen bietet. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zu leisten zum besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Hören und Sehen von Objekten. Weiterhin kann die Kenntnis dieser Zusammenhänge in Bezug auf Lautsprecher von praktischem Nutzen sein in der Herstellung von Lautsprechern.

2 Stand der Forschung

2.1 Multimodale Wahrnehmung

Ständig wirken Reize auf uns ein. Unsere Umwelt sendet ununterbrochen Signale aus, die wir mithilfe unserer Sinnesorgane wahrnehmen können. Wir können Dinge fühlen, hören, riechen, sehen oder schmecken. Reize lassen sich diesen unterschiedlichen Sinnen oder Modalitäten zuordnen. So ist es klar, dass wir beispielsweise einen Geruch, sei er noch so markant oder intensiv, nicht sehen oder hören können. Gleichwohl kann es sein, dass eine Reizquelle mehrere Modalitäten anregt. Kann unser Wahrnehmungskomplex nun Reize verschiedener Modalitäten in Zusammenhang bringen und einer gleichen Quelle zuordnen, so kann dies die gesamte Wahrnehmung dieser Quelle mitunter entscheidend beeinflussen.
Die Wahrnehmung über mehrere Sinneskanäle gleichzeitig wird als multimodal, die über nur einen einzelnen Kanal als unimodal bezeichnet. In der Natur nehmen wir die allermeisten Dinge multimodal wahr. Stürmt es zum Beispiel draußen vor dem Fenster, so können wir dies bei einem geschlossenen und schallundurchlässigen Fenster zunächst nur sehen (unimodal). Öffnen wir aber das Fenster, kann das Hören dazukommen, und stecken wir einmal den Kopf oder eine Hand aus dem Fenster, ist der Sturm vielleicht sogar spürbar (multimodal).
In der Natur hat es unser Wahrnehmungssystem in der Regel mit multimodalen Reizen zu tun, bei denen die einzelnen Modalitäten Informationen liefern, die aufgrund unserer Erfahrung zu einander passen oder kommensurabel sind [1]. Es fällt uns damit meist leicht, diese einer bestimmten Reizquelle zuzuordnen. Sehen wir einen Apfel und beißen dann in diesen hinein, erwarten wir auch den Geschmack eines Apfels und nicht den einer Banane und werden in dieser Hinsicht auch eigentlich nie enttäuscht. Vielmehr verstärkt sich unser bisheriger Eindruck, dass es sich um einen Apfel handelt, durch die Modalität des Schmeckens (vgl. [2, S.14]). Insbesondere in künstlich hergestellten Situationen kann es aber vorkommen, dass sich die Eindrücke zweier Modalitäten nicht sinnvoll ergänzen, sondern Konflikte in der Wahrnehmung hervorrufen. Wir sprechen in diesem Fall von Konfliktreizen.

Auch bei solchen Konfliktreizen kann eine Modalität auf eine andere und auf die gesamte Wahrnehmung Auswirkungen haben.

2.2 Audiovisuelle Wahrnehmung

Als audiovisuelle Wahrnehmung bezeichnet man nun das Zusammenwirken auditiver und visueller Wahrnehmung, also des Hörens und Sehens. Viel Forschung ist seit einiger Zeit auf diesem Gebiet betrieben worden. Da es sich aber um ein sehr großes Feld handelt, bietet es dennoch viel Platz für weitergehende Untersuchungen.

Patsouras, Filippou und Fastl untersuchten die Auswirkungen von visuellen Reizen auf die Empfindung von Lautheit [3]. Sie spielten Versuchspersonen über Kopfhörer den Klang eines vorbeifahrenden Zuges vor und präsentierten ihnen gleichzeitig das Bild eines ICE. Während hierbei der Klang stets der gleiche war, wurde die Farbe der Züge auf den Bildern variiert. Es wurden weiße (Originalfarbe eines ICE), sowie rot, grün und blau eingefärbte Züge gezeigt. Die Versuchspersonen wurden nun gebeten, die Lautheit des immer gleichen Klangs bei Betrachtung eines jeweils andersfarbigen Zuges zu bewerten. Hierbei konnte unter anderem eine empfundene Lautheit registriert werden, die um bis zu 12% höher war, wenn das Bild einse rot gefärbten Zuges gezeigt wurde. Grünfarbene Züge hingegen schienen das Lautheitsempfinden zu senken. Dieser Effekt ist jedoch je nach Individuum unterschiedlich stark ausgeprägt.

Sehr ähnliche Beobachtungen konnten Menzel, Fastl, Graf und Hellbrück in einem Versuch mit Sportautos machen [4]. Auch hier wurde ein rotes Auto von Versuchspersonen als lauter empfunden. Die genannten Effekte konnten in Experimenten erzeugt werden, obgleich als optische Stimuli lediglich Bilder der Züge und Autos verwendet wurden und keine realen Objekte.

Die beschriebenen Studien untersuchten jeweils die Wirkung eines visuellen Reizes auf die wahrgenommene Intensität eines auditiven. Ebenso gibt es Effekte, die eine andere Komponente der auditiven Wahrnehmung beeinflussen. Viele Experimente wurden gemacht, die die Lokalisation einer Schallquelle im Raum durch den Hörer untersuchen. Ein gesundes menschliches Gehör ist in der Lage, die Schalleinfallsrichtung in der Horizontalebene auf minimal etwa 1° genau aufzulösen [5, S.31]. Ein Mensch kann es also merken, wenn sich eine Schallquelle um 1° zu einer Seite bewegt. Dies ist die absolute Untergrenze und gilt für den Fall der rein auditiven Wahrnehmung. Kommt der visuelle Eindruck hinzu, hat dies wesentlichen Einfluss auf die Lokalisation. Dies lässt sich zeigen, indem man einen Konfliktreiz herstellt,

also einen Stimulus, der für auditive und visuelle Wahrnehmung Informationen liefert, die nicht zusammenpassen. Pick, Warren und Hay taten dies, indem sie Versuchspersonen die Quelle eines für sie hörbaren akustischen Signals zwar sehen ließen, jedoch durch ein Prisma, so dass eine räumliche Diskrepanz zwischen akustischem und optischem Signal entstand [6]. Als sie die Versuchspersonen nun zeigen ließen, wo sie die akustische Quelle vermuten, konnten sie feststellen, dass sich die auditiv wahrgenommene Position in Richtung der visuellen verschiebt, so beide parallel dargeboten werden. Howard und Templeton bezeichneten dies als den Bauchredner-Effekt (*Ventriloquism effect*), da ein Bauchredner und seine Puppe sich diesen Effekt in anschaulicher Weise zunutze machen [7]. Der Künstler spricht, ohne seine Lippen zu bewegen, die Puppe bewegt nur die Lippen und der Zuschauer denkt, die Wörter kämen aus dem Munde der Puppe. Dieser Effekt ist so robust, dass er bis zu einer Differenz der Reizpositionen von ca. 30° [8], bzw. $28° - 38°$ [9] auftritt. Nahezu alltäglich begegnen wir dem Bauchredner-Effekt beim Fernsehen. Bildschirm und Lautsprecher können hier physisch nicht an der gleichen Position stehen, weshalb die Lautsprecher in der Regel seitlich daneben platziert sind. Dennoch nimmt der Zuschauer den Schall als z.B. aus dem Munde des Nachrichtensprechers kommend wahr.

Tritt ein Konfliktreiz in der Lokalisation zwischen auditivem und visuellem Wahrnehmen nicht in seitlicher Ausrichtung auf, sondern in der Tiefe, also der Entfernung, lassen sich ebenfalls Auswirkungen einer Modalität auf die andere feststellen. Gardner führte einen Versuch durch, bei dem er fünf Lautsprecher direkt hintereinander auf Augenhöhe einer Versuchspersonen positionierte [10]. Die Person konnte somit nur den vorderen Lautsprecher sehen, die Positionen der hinteren wurden aber durch Markierungen sichtbar gemacht. Es wurde nun eine Sprachaufnahme über den letzten Lautsprecher in der Reihe wiedergegeben, also den vom Hörer am weitesten entfernten. Dennoch gaben die Versuchspersonen ausnahmslos den vordersten Lautsprecher als akustische Quelle an. Man bezeichnet dies als den *Proximity Image Effect*.

Da sich in beiden hier beschriebenen Fällen des Versatzes in der Lokalisation der auditive Eindruck in Richtung des visuellen bewegt und somit anscheinend der visuelle überwiegt, werden derartige Phänomene auch als *Visual-Capture-Effects* bezeichnet. Die Lokalisation von Schallquellen unter Einfluss von visuellen Reizen bietet sehr schöne und anschauliche Beispiele für Effekte der audiovisuellen Wahrnehmung. Sie wurde daher in vielen weiteren Studien untersucht. Übersichten über derartige Arbeiten liefern zum Beispiel Kohlrausch und van de Par [11, S.115-117] oder Howard und Templeton [7].

Auch McGurk und MacDonald stellten in einem Hörversuch Konfliktreize her und untersuchten damit die Bedeutung des Auditiven und Visuellen in der sprachlichen Kommunikation [12]. Es bestand hier jedoch kein räumlicher Konflikt sondern ein sinnhafter. Sie erstellten Video- und Audioaufnahmen einer Sprecherin, die wiederholt die Silben /ba/ und /ga/ sprach. Anschließend zeigten sie Versuchspersonen das Videomaterial zu einer Silbe und gleichzeitig das Audiomaterial der anderen – also nicht zueinander passende Reize. Sie konnten so feststellen, dass die meisten Personen, die /ba/ hören, aber /ga/ sehen, insgesamt die Silbe /da/ wahrnehmen. Das Wahrnehmungssystem fasst hier gewissermaßen beide konfliktbehafteten Eindrücke zusammen und bildet ein Mittel. Vertauscht man optische und akustische Stimuli, lässt also die Versuchspersonen /ga/ hören und /ba/ sehen, bildet die Mehrheit der Leute aus der Wiederholung der Silben eine Kombination aus beidem und nimmt /bagba/ oder /gaba/ wahr. Dieses Phänomen konnte sowohl bei Kindern als auch erwachsenden Versuchspersonen festgestellt werden. Ähnliche Ergebnisse konnte man zudem in weiteren Versuchen für die Silben /ka/ und /pa/, also mit härteren Anlauten, nachweisen.
Eine weiterer die Sprachverständlichkeit betreffender Effekt, den wohl jeder aus seinem Alltag kennt, ist der *Cocktail-Party-Effect* [13]. Er beschreibt das Phänomen, dass bei Vorhandensein von vielen akustischen Störsignalen wie etwa auf einer Cocktail-Party, wo viele Menschen durcheinander reden, die Verständlichkeit von Sprache deutlich erhöht wird, wenn der Zuhörer seine Aufmerksamkeit auf den Sprecher lenkt und vielleicht sogar dessen Lippenbewegungen sehen kann. Das menschliche Gehör ist also in der Lage, Störgeräusche weitgehend auszublenden und sich so auf die aktuell wichtige Information zu konzentrieren, so dass diese auch unter schwierigen Bedingungen gut wahrnehmbar ist.
Maempel und Jentsch untersuchten die audiovisuelle Wahrnehmung von Räumen und insbesondere von Abständen und Raumgrößen [14]. Es wurden hier in zwei unterschiedlichen Versuchsteilen Konfliktreize hergestellt – zum einen, indem stereoskopische Fotos von Räumen gezeigt wurden und gleichzeitig eine akustische Simulation eines anderen Raumes erzeugt wurde, zum anderen, indem Räume in passender, nicht konfliktbehafteter optischer und akustischer Kombination präsentiert wurden, sowie auch einzeln rein akustisch und rein optisch. Die Räume wurden hierbei durch dynamische Binauralsynthese akustisch simuliert. Sowohl das methodische Konzept der Herstellung von kongruenten Reizen sowie von Konfliktreizen, als auch die Verwendung von dynamischer Binauralsynthese für eine akustische Simulation werden in sehr ähnlicher Weise auch in der Untersuchung der hier vorliegenden Arbeit verwendet.

Die Ergebnisse des Versuches zeigten eine allgemein gute Quelldistanzschätzung unter der visuellen Bedingung und eine überschätzte Distanz unter der auditiven. Audiovisuell bildeten die Versuchspersonen einen Mittelwert aus beiden Eindrücken. Dies steht im Gegensatz zu dem von Gardner gefundenen *Proximity Image Effect*. Die Raumgröße wurde von den Versuchsteilnehmern in fast allen Fällen als zu klein eingeschätzt. Es konnte hier aber herausgefunden werden, dass die optische Raumgröße einen größeren Anteil am Gesamturteil der Personen hat als die akustische. Besonders interessant ist zudem, dass die beste Raumgrößenschätzung hier nicht bei optisch und akustisch kongruenten Stimuli erzielt wurde, sondern bei einem Raum, der optisch größer ist als akustisch.

2.2.1 Audiovisuelle Qualitätsbewertung

Erkenntnisse über die Auswirkungen audiovisueller Wahrnehmung auf die Qualitätsbewertung von Quellen gewinnen derzeit immer mehr an Bedeutung. Dies betrifft vor allem Video-Wiedergabesysteme in der Unterhaltungsindustrie oder Anwendungen in der Video-Telefonie. Mehrere Studien untersuchten, wie Versuchspersonen die Qualität von Audio- und Video-Signalen bewerten, wenn diese allein oder zusammen dargeboten werden, bzw. wenn eines der beiden Signale beispielsweise durch Datenkompressionsalgorithmen in der Qualität verändert wird. Interessant ist, dass zwar in nahezu allen Untersuchungen zu diesem Thema ein Einfluss der einen Modalität auf die andere gefunden werden konnte, es aber scheinbar nicht einfach möglich ist, diesen Einfluss zu quantifizieren oder eine für diesen Bereich dominante Modalität zu benennen. Beerends und De Caluwe fanden beim Abspielen von zwei Video-Werbespots in unterschiedlicher Audio- und Video-Qualität einen deutlichen Einfluss der Video-Qualität auf die wahrgenommene auditive Qualität [15]. Umgekehrt hatte in ihrem Versuch die Audio-Qualität nur sehr geringe Auswirkung auf die wahrgenommene visuelle. Zudem zeigte ihr Experiment eine deutlich größere Bedeutung der Video-Qualität für die gesamte wahrgenommene audiovisuelle Bewertung der Qualität.
In einem ähnlichen Experiment von Rimell, Hollier und Voelcker konnte ein ähnlich starker Einfluss der Video-Qualität auf den auditiven Eindruck gefunden werden, jedoch auch ein fast gleich starker in der anderen Richtung [16]. Die Qualität des dargebotenen Audio-Signals war hier also auch von entscheidender Bedeutung für den visuellen Eindruck.
Auch in weiteren Untersuchungen wurden audiovisuelle Effekte bezüglich der Qualität von Video- und Audio-Wiedergaben gefunden, zusammengefasst z.B. in [11, S.121-125]. Die Studien liefern jedoch keine klar einheitlichen Ergebnisse. Grün-

de für diese Unterschiede könnten das Verwenden unterschiedlicher Verfahren zur künstlichen Veränderung der einzelnen Qualitäten und die damit einhergehende schwere Vergleichbarkeit der Größen Audio- und Video-Qualität sein, sowie das Verwenden sehr unterschiedlichen Materials als Inhalte der Stimuli.
Führt man sich nun vor Augen, dass visuelle Wahrnehmung auch in solchen Situationen eine wichtige Rolle spielt, die wir eigentlich eher mit dem Hören assoziieren, wie beispielsweise die sprachliche Kommunikation, so liegt die Vermutung nahe, dass neben den in diesem Abschnitt bereits beschriebenen Wiedergabesystemen für Video auch bei reinen Audiosystemen die optische Komponente einen Einfluss auf die gesamte Wahrnehmung hat, dass also das Aussehen von z.B. HiFi-Komponenten sich entscheidend auf diese auswirken kann. Auch bei Audio-Wiedergabesystemen ist es häufig ein Ziel, eine insgesamt möglichst hohe Qualitätsbewertung beim Hörer zu erzielen.
In einem Hörversuch fragte Hugo Fastl Versuchspersonen nach ihrem Qualitätsurteil über eine Sprachaufnahme, die zuvor in einem Konzertsaal in unterschiedlichen Entfernungen zur Quelle aufgenommen wurde [17, S.157-159]. Die Personen hörten diese Aufnahme zunächst nur und bekamen dann zusätzlich Fotos aus Sicht der Aufnahmeposition zu sehen, wodurch sie die Entfernung zur Quelle auch visuell abschätzen konnten. Fastl fand hier eine Abhängigkeit des Qualitätsurteils von der Modalität und der Entfernung zur Quelle. Die Aufnahme wurde audiovisuell schlechter bewertet als rein auditiv, wenn sie dem Hörer nahe war, und besser, wenn sie weit entfernt war.
Kim Schuker untersuchte in ihrer Bachelorarbeit den Einfluss der Farbe eines Mikrofons auf die Bewertung von Sprachaufnahmen [18]. Sie spielte 26 Experten aus dem Bereich der Tontechnik Aufnahmen einer professionellen Sprecherin vor und zeigte dazu sieben unterschiedlich lackierte Mikrofone (bzw. teilweise Bilder von diesen). In einem Paarvergleich sollten die Versuchspersonen jeweils benennen, welches Mikrofon sie „heller", „offener" und „voller" klingend fanden. Sie konnte herausfinden, dass in diesen Kategorien Farben wie Braun oder Schwarz, die man aus Erfahrung eher mit Mikrofonen verbindet, aber auch Weiß höher bewertet werden als z.B. die Farben Blau und Grün. Die Farbe hat also einen Einfluss auf die empfundene Qualität von gehörtem Audiomaterial.
Die einzelnen Teilnehmer dieser Studie absolvierten den Versuch jedoch teilweise unter unterschiedlichen Bedingungen. Sie wurden beispielsweise in verschiedenen Räumen getestet, und von einigen Personen wurde der Versuch am heimischen PC durchgeführt. Sowohl die akustischen als auch optischen Wiedergabesysteme der einzelnen Personen können hierbei sehr verschieden sein, und es wurden somit

einige unkontrollierbare unabhängige Variablen eingeführt.

2.2.2 Audiovisuelle Wahrnehmung von Lautsprechern

Wenige Untersuchungen wurden bislang über das audiovisuelle Wahrnehmen von Lautsprechern angefertigt. Menzel führte einen Versuch mit Bildern von Radios in unterschiedlichen Farben durch, bei dem er Personen bat, während des Betrachtens eines der farbigen Bilder die Lautstärke von Sprach- und Musikaufnahmen so einzustellen, dass es ihnen am angenehmsten ist [19]. Neben für ein Radio üblichen Reglern für z.B. Frequenz oder Lautstärke, verfügten die gezeigten Radios über einen eingebauten Lautsprecher. Hierbei konnte zwar kein generell signifikanter Einfluss der Farbe auf den eingestellten Pegel gefunden werden, dennoch war zu beobachten, dass einige Versuchspersonen einen gegenüber dem Durchschnitt um 0,5 bis 1dB niedrigeren Pegel als angenehmsten empfanden, wenn sie dabei ein blaues oder graues Radio sahen. Menzel weist darauf hin, dass die Verwendung von Objekten wie zum Beispiel echten Radios statt Bildern die Verbindung zwischen auditivem und visuellem Eindruck eventuell noch stärken könnte [19].
Karandreas und Christensen führten 2007 einen Versuch durch, in dem Sie Versuchspersonen die Qualität von Lautsprechern bewerten ließen [20]. Dies sollten die Versuchspersonen zunächst nur dem Aussehen der Lautsprecher nach tun, also nur visuell. Ebenso wurde das verwendete Audiomaterial auch einmal rein auditiv bewertet, während die Lautsprecher für die Versuchspersonen nicht zu sehen waren. Schließlich sahen die Personen dann jeweils fünf verschiedene in Stereo-Anordnung platzierte Lautsprecherpaare, hörten dazu aber den Klang eines einzelnen Lautsprechers, der sich hinter einem Vorhang befand. Dieser akustische Stimulus wurde zuvor digital bearbeitet. Er wurde einerseits teilweise hochpassgefiltert, andererseits wurden ihm harmonische Verzerrungen unterschiedlichen Pegels zugefügt. Hiermit sollte Varianz in der Qualität hergestellt werden und z.B. die Unterschiede in Lautsprechern – wie etwa verschiedene Membrangrößen – oder das Betreiben eines Lautsprechers jenseits seines linearen Wiedergabebereiches simuliert werden. In diesem Versuch konnte kein signifikanter Einfluss des Visuellen auf die Bewertung der Klangqualität gefunden werden. Die verschiedenen akustischen Stimuli wurden sowohl unter rein auditiver als auch unter audiovisueller Bedingung ähnlich bewertet.
Eine Schwierigkeit bei dem beschriebenen Vorgehen besteht zweifellos darin, den Versuchspersonen glaubhaft zu machen, dass der von ihnen gehörte Klang tatsächlich aus den gesehenen Lautsprechern kommt. Die Lautsprecher waren neben-

einander angeordnet. Somit ergibt sich von innen nach außen eine immer größer werdende Differenz zwischen visuellem und auditivem Reiz. Die Versuchspersonen wurden vor dem Versuch darauf hingewiesen, dass beide Lautsprecher den gleichen Klang produzieren und sie daher keinen Stereo-Klang hören und es sich so anhören könne, als komme das Signal aus der Mitte. Dennoch bleibt es fraglich, ob diese Ankündigung den Konfliktreiz für das Wahrnehmungssystem plausibel macht, und es erscheint sinnvoll, einen ähnlichen Versuch unter Bedingungen durchzuführen, die für Versuchspersonen eine Situation darstellen, die ihnen vertrauter ist und alltägliche, natürliche Erfahrungen beim Hören von Audiosignalen über Lautsprecher besser abbildet.
Die Autoren fragten in ihrem Versuch unter allen Bedingungen (auch unter der rein visuellen) stets nach der Klangqualität. Sie weisen auch darauf hin, dass es von Interesse sein kann, zu untersuchen, welche einzelnen Faktoren wichtig sind für die gesamte Wahrnehmung des Produktes Lautsprecher.

3 Hörversuch

Die vorliegende Arbeit dokumentiert eine empirische Untersuchung zur audiovisuellen Wahrnehmung von Lautsprechern und zur Bewertung der Qualität dieser Lautsprecher. In diesem Kapitel werden der Forschungsgegenstand, Überlegungen zum Versuchsdesign, die Durchführung sowie die technische Realisation des Hörversuchs beschrieben.

3.1 Untersuchungsgegenstand

Wie in Kapitel 2 aufgezeigt wird, ist das Feld der audiovisuellen Wahrnehmung insbesondere bezogen auf den Multimedia- oder HiFi-Bereich ein junges, noch nicht weit erforschtes Gebiet. Unser Alltag ist heute jedoch sehr gezeichnet von Situationen, in denen wir Klänge wahrnehmen, die von verschiedensten Multimedia-Geräten erzeugt werden. Führt man sich vor Augen, dass – wie aus anderen Bereichen der audiovisuellen Wahrnehmung bekannt – das Zusammenspiel des menschlichen Hörens und Sehens ein äußerst komplexes, anpassungsfähiges Konstrukt ist und jede der beiden Modalitäten wichtigen Einfluss auf die gesamte Wahrnehmung haben kann, erscheint es sinnvoll, dieses Zusammenwirken auch in Bezug auf genannte Multimediaanwendungen hin zu untersuchen. In diesem Versuch soll dafür die audiovisuelle Wahrnehmung von Lautsprechern und damit das letzte Glied in der Audioübertragungskette betrachtet werden. Es wird die Frage beleuchtet, wie Lautsprecher durch die Modalitäten Hören und Sehen wahrgenommen werden und insbesondere, wie deren Qualität bewertet wird. Hierbei soll vor allem ein Augenmerk darauf gelegt werden, wie sich Bewertungen ändern, wenn diese Lautsprecher rein auditiv, rein visuell oder audiovisuell wahrgenommen werden. Im Fall der audiovisuellen Wahrnehmung soll getestet werden, ob ein Einfluss einer Modalität auf die andere, bzw. auf die Gesamtwahrnehmung existiert und gegebenenfalls versucht werden, diesen zu quantifizieren. Eine Kenntnis des Zusammenarbeitens von Hören und Sehen in Bezug auf Lautsprecher kann nicht nur für den Herstellungsprozess innnerhalb der Lautsprecherindustrie von Bedeutung sein, sondern ist

vor allem Teil der gesamten Forschung über audiovisuelles Wahrnehmen und kann somit helfen, Prozesse, die zu einer gemeinsamen Wahrnehmung führen, besser zu verstehen.

3.2 Versuchsdesign

Die Idee dieses Hörversuch ist es, Versuchspersonen mehrere unterschiedliche Lautsprecher sowohl separat auditiv als auch visuell und schließlich audiovisuell bewerten zu lassen. Für letzteren Fall werden unter anderem Konfliktreize hergestellt, bei denen die Versuchspersonen einen Lautsprecher hören, jedoch gleichzeitig einen anderen sehen. Es müssen dementsprechend also mehrere unterschiedliche akustische sowie optische und optoakustische Stimuli erzeugt werden. In Anlehnung an Maempel [21] wurde der Versuch mit dem Kopräsenz-Paradigma und dem Konfliktreiz-Paradigma in zwei Abschnitte unterteilt.

3.2.1 Kopräsenz-Paradigma

Das Kopräsenz-Paradigma bezeichnet den Teil des Versuches, in dem ausschließlich Stimuli zum Einsatz kommen, die in den verschiedenen Modalitäten keine Konflikte erzeugen. Es werden also hier sowohl rein akustische und rein optische Stimuli verwendet, als auch optoakustische Stimuli, bei denen die optische und akustische Komponente derselben Reizquelle – demselben Lautsprecher – entstammen. Anders ausgedrückt könnte man sagen, die Lautsprecher werden hier so präsentiert, wie sie sind und *in der Natur* vorkommen.
Im Falle des Kopräsenz-Paradigmas werden mit der Modalität und den Lautsprechern somit zwei Faktoren variiert. Für die Modalität ergeben sich mit den Varationen *auditiv*, *visuell* und *audiovisuell* drei Faktorstufen. Die Anzahl der Faktorstufen für den zweiten Faktor ergibt sich aus der Anzahl der verwendeten unterschiedlichen Lautsprecher.
Da jeder Lautsprecher mit allen drei Stufen des Faktors Modalität kombiniert werden soll, erhalten wir schließlich $3*n$ Stimuli, wobei n die Anzahl der Lautsprecher darstellt.

3.2.2 Konfliktreiz-Paradigma

Im Konfliktreiz-Paradigma werden ausnahmslos multimodale in diesem Fall also audiovisuelle Reize erzeugt und somit nur optoakustische Stimuli verwendet. Hier-

bei sollen nun Konflikte in den unterschiedlichen Modalitäten hergestellt werden, indem die optische Komponente eines Lautsprechers mit der akustischen eines anderen kombiniert wird. Ziel ist es also, die Versuchspersonen einen Lautsprecher sehen, aber gleichzeitig einen anderen hören zu lassen. Da es jedoch nicht möglich ist, zwei verschiedene Lautsprecher physikalisch an denselben Ort zu stellen, muss eine der beiden Komponenten simuliert werden. Die akustische Simulation erscheint hier als die einfachere Lösung, da hierfür bereits Systeme existieren, die nachweislich überzeugende Ergebnisse liefern. Am Fachbereich für Audiokommunikation der Technischen Universität Berlin ist solch ein System vorhanden, welches dynamische Binauralsynthese für die Simulation verwendet [22]. Die Umsetzung dieser Simulation für den Hörversuch wird in 3.5 beschrieben.
Das Aussehen jedes verwendeten Lautsprechers soll im Konfliktreiz-Paradigma mit dem Klang jedes verwendeten Lautsprechers kombiniert werden, bzw. die akustische Komponente jedes Lautsprechers wird mit der optischen jedes Lautsprechers verknüpft. Dies schließt also auch die Fälle der akustisch und optisch kongruenten Stimuli ein, bei denen Akustik und Optik von demselben Lautsprecher kommen. Diese Fälle sind bereits im Kopräsenz-Paradigma enthalten.
Aus diesen Überlegungen entstehen für das Konfliktreiz-Paradigma zwei zu variierende Faktoren, optischer und akustischer Lautsprecher. Jeder dieser Faktoren hat natürlich so viele Faktorstufen, wie unterschiedliche Lautsprecher in dem Versuch verwendet werden.
Da alle Lautsprecher optisch und akustisch kombiniert werden, ergeben sich weiterhin $n * n = n^2$ Stimuli (mit $n = \textit{Anzahl der Lautsprecher}$). Da wie bereits erwähnt n Fälle hiervon bereits im Kopräsenz-Paradigma enthalten sind, haben wir nun insgesamt für beide Paradigmen

$$n^2 + 3n - n = n^2 + 2n$$

Stimuli. Man sieht also, dass die Anzahl der Stimuli mit steigender Anzahl der Lautsprecher quadratisch zunimmt. Um den Aufwand in vertretbarem Umfang zu halten, sollen daher fünf verschiedene Lautsprecher für den Versuch ausgewählt werden. Somit erhalten wir nach obiger Formel insgesamt 35 unterschiedliche Stimuli (vgl. [21], [23]). Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die Stimuli beider Paradigmen.

Aufgrund der hohen Anzahl an verschiedenen Stimuli würde das Ziehen einer unabhängigen Stichprobe zu einer zu großen Zahl an benötigten Versuchspersonen führen. Daher wird eine abhängige Stichprobe gewählt. Jede Versuchsperson soll

Tabelle 3.1: Versuchsdesign und Stimuli, o = rein optisch, a = rein akustisch, oa = optoakustisch, weiße Zellen gehören zum Konfliktreiz-Paradigma, hellgraue Zellen zum Kopräsenz-Paradigma und dunkelgraue Zellen zu beiden Paradigmen (vgl. [21])

		Akustischer LS					
		o	1	2	3	4	5
Optischer LS	a		a	a	a	a	a
	1	o	oa	oa	oa	oa	oa
	2	o	oa	oa	oa	oa	oa
	3	o	oa	oa	oa	oa	oa
	4	o	oa	oa	oa	oa	oa
	5	o	oa	oa	oa	oa	oa

dann jeden einzelnen Stimulus bewerten. Um Sequenzeffekte zu minimieren, sollen die Stimuli in randomisierter Reihenfolge dargeboten werden, soweit die weiteren Überlegungen zur Versuchsdurchführung dies zulassen.

3.3 Lautsprecher

Lautsprecher gibt es heute in einer Vielzahl an Variationen. Dies betrifft sowohl die akustischen Eigenschaften wie auch das optische Design. Die in dieser Arbeit untersuchte Fragestellung richtet sich auf das Urteil über einen Lautsprecher durch einen Hörer. Sie adressiert nicht Experten wie etwa Tonmeister, Musiker oder Audio-Ingenieure, sondern den normalen Musik- oder Sprache-Hörer als Endnutzer des Produktes Lautsprecher. Menschen, die beruflich mit dem Hören von Audio-Signalen durch ein Wiedergabesystem zu tun haben, achten bei ihrer Bewertung eines solchen Systems eventuell auf andere Parameter und können für diesen Fall vielleicht sogar besser das Auditive vom Visuellen trennen. Da nun die Zielgruppe aus Nichtexperten besteht, sollen für den Hörversuch HiFi-Lautsprecher verwendet werden und keine Studiomonitore oder sonstige Modelle aus dem professionellen Bereich. Weiterhin wird der Versuch mit Stereo-Paaren der Lautsprecher durchgeführt, um Bedingungen herzustellen, die der vermutlich gewohnten Abhörsituation der Versuchspersonen möglichst nahe kommen.
Einiger Überlegung bedarf die Auswahl von fünf verschiedenen Lautsprechertypen für den Versuch. Ziel ist es, Lautsprechermodelle zu finden, die eine möglichst

große Varianz in der Bewertung erzeugen. Es sollten daher Modelle verwendet werden, die sich in Aussehen und Klang deutlich voneinander unterscheiden. Diese verschiedenen Eigenschaften sollten zunächst gedanklich voneinander getrennt werden. Im folgenden wird daher zwischen *akustischen*, *optischen* und *strukturellen* Merkmalen unterschieden. Akustische Merkmale sind messbare akustische Parameter wie etwa der Frequenzgang, der Klirrfaktor oder die Abstrahlcharakteristik, zu den optischen Eigenschaften zählen beispielsweise die Farbe und die Lasur der Lautsprecherbox. Strukturelle Eigenschaften sind alle Eigenheiten, die die Struktur oder den Aufbau des Lautsprechers betreffen, wie etwa die Größe, die Anzahl der Chassis, das Vorhandensein eines Bassreflextunnels oder die Form des Gehäuses.
Im Idealfall wird jeweils eine Eigenschaft markant verändert, während die anderen weitestgehend konstant bleiben, um später leichter spezifizieren zu können, welches Merkmal als Ursache für einen beobachteten Effekt in Frage kommt. Trotz dieser nötigen Veränderung einzelner Eigenschaften, können aus oben genannten praktischen Gründen dennoch nur fünf unterschiedliche Modelle gewählt werden. Da die Untersuchung vor allem die Qualität der Lautsprecher betrachtet, werden daher Modelle in akustisch guter und schlechter sowie optisch guter und schlechter Qualität ausgesucht. Hierbei soll gute akustische Qualität vor allem beschrieben sein durch einen möglichst linearen Frequenzgang und eventuell gute Verzerrungswerte. Für die optische Qualität wird auf allgemein hochwertiges Aussehen wie zum Beispiel gute oder schlechte Verarbeitung oder aufwendig und einfach lackierte Boxen geachtet. Versucht man, Lautsprecher zu finden, die jeweils die Eigenschaften *akustisch gut* und *schlecht* mit *optisch gut* und *schlecht* kombinieren, benötigt man bereits vier unterschiedliche Modelle. Es wird daher nur noch in einem weiteren Lautsprecher das *strukturelle* Merkmal *Größe* variiert. Während erstere vier Lautsprecher mit etwa der Größe eines üblichen Regallautsprechers *klein* sind, soll dieser eine weitere erheblich *größer* ausfallen – beispielsweise ein Standlautsprecher. Dieser größere Lautsprecher soll ein akustisch und optisch guter sein. Tabelle 3.2 zeigt die genannten Auswahlkriterien und die dazu ausgewählten Lautsprechermodelle in einer Übersicht und Abbildung 3.1 Fotos der einzelnen Modelle.

Beim Aussuchen von Lautsprechermodellen hat es sich als sehr schwierig erwiesen, Lautsprecher zu finden, die all diesen Anforderungen genügen. Während es weitgehend problemlos möglich ist, entweder akustisch und optisch gute oder akustisch und optisch schlechte Modelle zu identifizieren, gestaltet sich die Suche nach solchen Lautsprechern, die jeweils eine gute und eine schlechte Komponente kombinieren – und hier insbesondere die Kombination akustisch gut, optisch schlecht

Tabelle 3.2: Auswahlkriterien und Lautsprecher für den Hörversuch; ein „–” steht für schlechte, ein „+” für gute Qualität.

	Größe	akustisch	optisch	verwendetes Modell
Lautsprecher 1	groß	+	+	Adam Column Mk3
Lautsprecher 2	klein	+	+	B&W DM601 S2
Lautsprecher 3	klein	-	-	JVC SP-E5
Lautsprecher 4	klein	+	-	Braun L420/1
Lautsprecher 5	klein	-	+	Heco Victa 201

–, weitaus schwieriger. Daher wurden die restriktiven Anforderungen an die Lautsprecher, vor allem was die akustischen Eigenschaften angeht, etwas gelockert. So wurde schließlich stets ein Auge auf den Frequenzgang geworfen und auf allgemein besseren und schlechteren Klang geachtet. Bei den beiden Lautsprechermodellen 4 und 5, also denen mit je einer guten und einer schlechten Eigenschaft, ist die ganz klare Einstufung der akustischen Komponente jedoch schwierig. Da es aber der bei der Auswahl der Lautsprecher wichtig ist, Varianz jeweils in den optischen und akustischen Eigenschaften zu erzeugen, stellt diese unscharfe Kombination innerhalb eines Modelles für den Versuch kein Problem dar. Zudem werden im Konfliktreiz-Paradigma ohnehin alle optischen Stimuli mit den akustischen aller anderen Lautsprecher kombiniert.

In der Vorbereitung des Versuches werden später mit einem Kunstkopf binaurale Raumimpulsantworten für jeden Lautsprecher in verschiedenen Winkeln gemessen (s. Abschnitt 3.5). Abbildung 3.5 und 3.6 zeigen die Betragsamplitudenspektren berechnet aus einer Impulsantwort dieser Messung. Das Übertragungsverhalten des gesamten Aufbaus, inklusive des Raumes und Einflüssen des Messroboters ist also hierin kodiert. Vergleicht man diese Kurven miteinander, lassen sich Unterschiede der einzelnen Lautsprecher ausmachen. Klar erkennbar ist beispielsweise ein deutlicher Einbruch beim *JVC*-Modell um die $100Hz$ sowie ein sehr starker Abfall zu den tiefen Frequenzen ab ca. $100Hz$ und ein schnellerer Abfall im hochfrequenten Bereich. Weiterhin gut zu sehen ist ein gegenüber den anderen Lautsprechern ausgeglichenes Übertragungsverhalten der ersten beiden Lautsprecher und insbesondere beim *Adam Column Mk3* das deutlich bessere Verhalten in den Tiefen unterhalb von $100Hz$. Die *Heco Victa 201*-Box weist einige kleinere Schwankungen in den Mitten und Höhen auf. Klare Überbetonungen, die bei allen Lautsprechern

auftreten, wie z.B. die hohen Werte bei ca. $4kHz$ sind Effekte des Raumes oder des Messroboters.
Für den Versuch wurden die Gitter oder Netze vor den Membranen entfernt, damit die Versuchspersonen Sicht auf die Membranen haben. Lediglich beim *JVC*-Modell konnte das Netz nicht entfernt werden, die unter dem Netz befindlichen Teile waren hier aber dennoch sichtbar. Das Firmenlogo des *B&W*-Lautsprechers ist deutlich am oberen Rand der Box zu sehen (Abb. 3.1(b)). Dieses wurde mit dunklem Klebeband abgeklebt, um somit eventuelle Vorurteile der Personen bezüglich des Herstellers auszuschließen. Bei allen anderen Modellen war der Hersteller nicht oder nur sehr schwer für die Versuchspersonen erkennbar.

3.4 Struktureller Versuchsaufbau

Der Versuch fand statt im Aufnahmeraum des Tonstudios am *Staatlichen Institut für Musikforschung* in Berlin. Dieser Raum ist frei von äußeren akustischen Einflüssen, ist gleichmäßig ausgeleuchtet und bietet zudem nur weitgehend neutrale visuelle Reize. So besitzt er keine Fenster und ist abgesehen von den für den Versuch benötigten Geräten nahezu leer. Abbildung 3.3 zeigt einen schematischen Überblick über Raum und Versuchsaufbau. Die für die Versuchsperson sichtbaren Wände sind mit einem Vorhang verdeckt. Alle Lautsprecher befinden sich auf einem mithilfe eines Elektromotors drehbaren Teller (*Outline ET2*). Auf diesem Teller wurde ein Kreuz aus Metallstreben aufgeschraubt, worauf schließlich eine fünfeckige Spanplatte gelegt wurde (Abb. 3.2). Diese Platte wurde mit einem grauen Tuch bedeckt, unter der die Lautsprecherkabel lagen. Auf dem Tuch wurden die Lautsprecher platziert. Da es sich um eine Stereoanordnung handelt, gab es diesen Drehteller in zweifacher Ausführung. Auf jeden Teller wurde je ein Lautsprecher eines Modells in gleicher Reihenfolge auf beide Teller gestellt.
Die Teller wurden an einer Seite des Raumes ca. $1,64m$ vor der Wand und mit Abständen von ca. $1,34m$ und $1,91m$ zu den Seitenwänden aufgestellt. Richtet man die Drehteller so aus, dass auf beiden Tellern jeweils das gleiche Lautsprechermodell in einem Winkel von $\pm 30°$ auf einen ca. $2,80m$ entfernten *Sweet Spot* zeigen, erhält man ein klassisches Stereodreieck (vgl. Abb. 3.3). Die Entfernungen wurden mithilfe eines Laser-Entfernungsmessers jeweils von der Mitte der Membranoberfläche des Hochtöners bei einem Lautsprecher gemessen. Bis auf den Standlautsprecher standen alle Modelle auf Lautsprecherstativen, deren Höhe so eingestellt war, dass sich jeweils die Höchtöner aller Lautsprecher auf einer Höhe, ca. $1,19m$ über dem

(a) Adam Classic Column Mk3

(b) B&W DM601 S2

(c) JVC SP-E5

(d) Braun L420/1

(e) Heco Victa 201

Abbildung 3.1: Im Hörversuch verwendete Lautsprecher

(a) Elektrischer Drehteller Outline ST2 mit aufgeschraubtem Metallkreuz

(b) Spanholzplatte auf dem Metallkreuz des Drehtellers

Abbildung 3.2: Präpariertier Drehteller, auf dem die Lautsprecher platziert wurden

Boden befanden, also etwa auf Ohrhöhe einer sitzenden Person. Im *Sweet Spot* des Stereodreiecks wurde ein Stuhl für die Versuchspersonen bereitgestellt.
Für die Durchführung des Versuches ist es wichtig, dass die später beschriebene akustische Simulation (3.9.2) für die Versuchspersonen plausibel ist. Es wurde daher auch darauf geachtet, dass der Abstand der Lautsprecher zum Hörer so groß ist, dass auch bei normalem Betrieb der Lautsprecher (also keiner akustischen Simulation) nahezu keine Membranbewegungen bei den Lautsprechern mehr gesehen werden konnten.

Mithilfe der Drehteller konnte nun leicht ein Lautsprecherpaar nach vorn gedreht werden und somit zu dem für die Versuchsperson frontal sichtbaren und aktuell aktiven Lautsprecher werden. Diese Möglichkeit des schnellen Wechselns der Lautsprecher war notwendig, da das Versuchsdesign eine zufällige Reihenfolge in der Darbietung der Stimuli erfordert.

3.5 Messung

Die akustische Simulation der Lautsprecher wurde mittels dynamischer Binauralsynthese umgesetzt. Ein geeignetes System zur Erzeugung der benötigten Signale ist am Fachbereich Audiokommunikation der TU Berlin vorhanden [22]. Für die Binauralsynthese muss zunächst einmal möglichst exakt die spätere Abhörsituation hergestellt werden. Anschließend setzt man an genau die Stelle, an der später ein Hörer bzw. die Versuchsperson sitzen wird, einen Kunstkopf und misst mit diesem

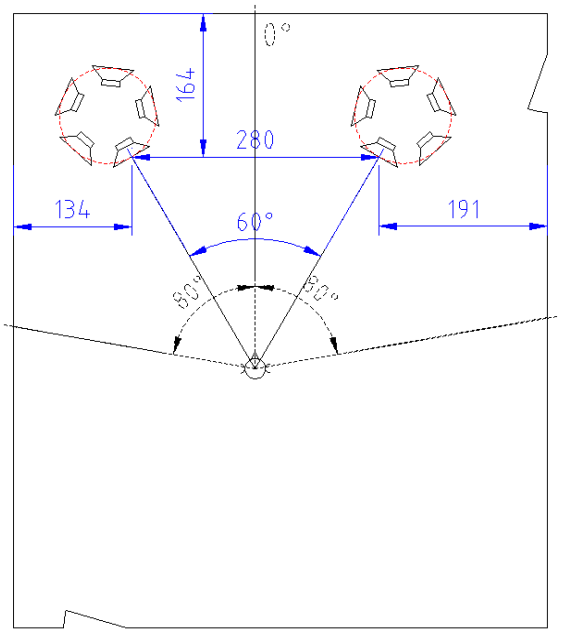


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau im Aufnahmeraum des SIM, alle Längenangaben in *cm*; der Winkel von 80° nach links und nach rechts vom Nullwinkel aus markieren den Bereich für die spätere Messung von Impulsantworten (s. 3.5)

nach Anregung der Quelle – in unserem Fall die Lautsprecher – binaurale Raumimpulsantworten (BRIR - *binaural room impulse response*). In diesen BRIR ist das gesamte Übertragungsverhalten des Systems, also der gesamte Signalweg vom Abspielgerät über Verstärker, Kabel, Lautsprecher durch den Raum bis schließlich zum Ohr des Hörers bzw. des Kunstkopfes charakterisiert. Durch Faltung dieser Impulsantwort mit einem beliebigen Eingangssignal ist es dann möglich, das Ursprungssignal an der Stelle des Ohres, bzw des Mikrofons wiederherzustellen. Gibt man dieses Signal anschließend über Kopfhörer wieder, so bietet sich dem Hörer eine sehr glaubwürdige Simulation der anfänglich gemessenen Schallquelle im Raum und des gesamten Setups zum Zeitpunkt der Messung. Insbesondere stellt die Kunstkopf-Methode sicher, dass bei einer anschließenden Wiedergabe über Kopfhörer keine Im-Kopf-Lokalisation durch den Hörer stattfindet, sondern eine virtuelle Schallquelle an der Position der ursprünglichen Quelle während der Messung lokalisiert wird. Dies funktioniert jedoch nur, solange die Kopfposition des Hörers genau der des Kunstkopfes während der Messung entspricht. Dreht allerdings der Hörer seinen Kopf und somit die Kopfhörer, bewegt sich die virtuelle Schallquelle mit der Kopfbewegung mit. Dieser Problematik kann begegnet werden, indem man einerseits nicht nur BRIR in einer Kopfposition des Kunstkopfes aufnimmt, sondern in vielen verschiedenen Winkeln, und andererseits beim Abhö-

Abbildung 3.4: Messroboter FABIAN auf dem Stuhl für die Versuchspersonen vor der Messung der BRIR

ren die Kopfhörer mit einem Headtracker ausstattet, der die Bewegung des Kopfes registriert. Anhand der Positionsdaten des Headtrackers lassen sich dann für die aktuelle Kopfposition geeignete BRIR für die Faltung mit dem Eingangssignal auswählen. Für den Hörer entsteht so eine virtuelle Schallquelle, die sich auch beim Drehen des Kopfes nicht mitbewegt, sondern an ihrer Position bleibt.
Für die Messung der BRIR wurde der am Fachbereich Audiokommunikation entwickelte Messroboter FABIAN verwendet [24]. Der Roboter bietet eine einfache Möglichkeit, die BRIR automatisiert über einen Bereich der Kopfpositionen von $\pm 80°$ zu messen. Hierbei betrug die Auflösung 1°. Es wurden also BRIR in 1°-Schritten von einer Kopfdrehung um 80° nach links bis 80° nach rechts gemessen. Somit erhält man am Ende der Messung einer Quelle in jede Richtung 80 BRIR plus eine in der Nullstellung, also der Kopfposition, in der der Roboter gerade nach vorn schaut. Das ergibt also

$$2 * 80 + 1 = 161$$

BRIR (stereo) pro Quelle. Jeder Lautsprecher eines Stereo-Paares wurde separat gemessen. Somit sind am Ende $2 * 161 = 322$ BRIR pro Lautsprechermodell vor-

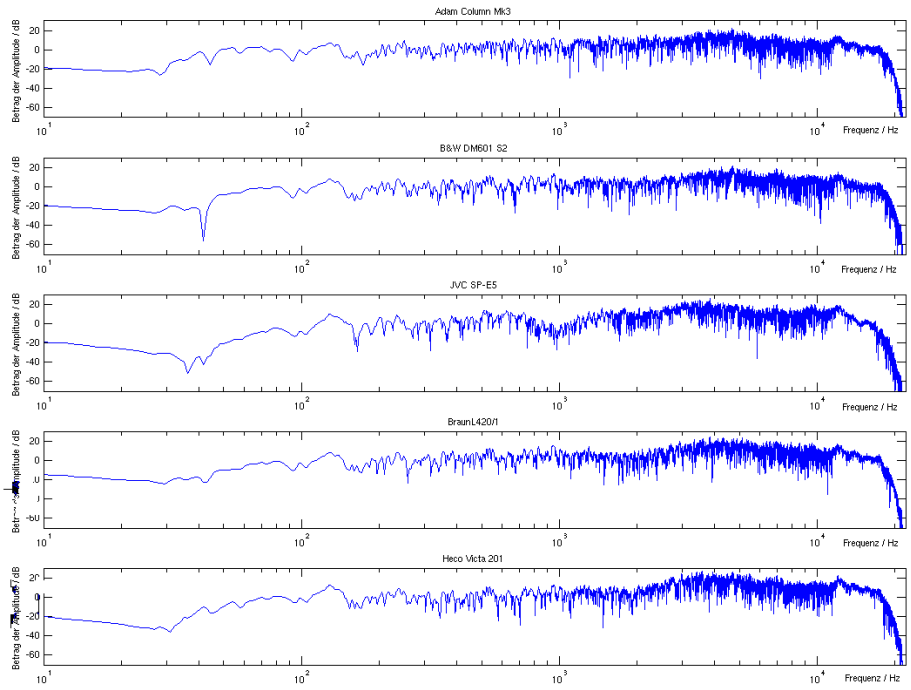


Abbildung 3.5: Übertragungsfunktion der jeweils linken Lautsprecher im Raum bei Messung mit dem Messroboter und einem Winkel von −30° (also frontalem Blick des Roboters auf den Lautsprecher), linkes Ohr

handen. Bei fünf Lautsprecherpaaren mussten also insgesamt 1610 BRIR gemessen werden.

Als Testsignal für alle Messungen wurden Sinussweeps verwendet (siehe dazu auch [22]). Verstärkt wurde das Signal durch einen *Yamaha P3500S* Verstärker.

Der Roboter wurde für die Messung auf den Stuhl für die Versuchspersonen gesetzt (s. Abb. 3.4). Die Ohren des Roboters und somit die Mikrofone befanden sich auf gleicher Höhe wie jeweils das Zentrum der Hochtöner eines Lautsprechers. Während der Messung trug der Roboter den Kopfhörer, der später die Simulation für die Versuchsperson wiedergeben soll.

Nach dem Erfassen aller nötigen BRIR werden im Versuch akustische Signale nur noch über Kopfhörer wiedergegeben, die Lautsprecher selber sind dann nur noch optische Quelle. Sie waren daher während des Versuchs an keinen Verstärker mehr angeschlossen, da somit das Problem des Eindrehens der Kabel durch die Drehteller vermieden werden konnte. Um die Simulation für die Hörer glaubwürdiger erscheinen zu lassen, wurden jedoch auch während des Versuches Kabel vom Verstärker bis unter die Drehteller liegengelassen. Ebenso führten Kabel von jedem

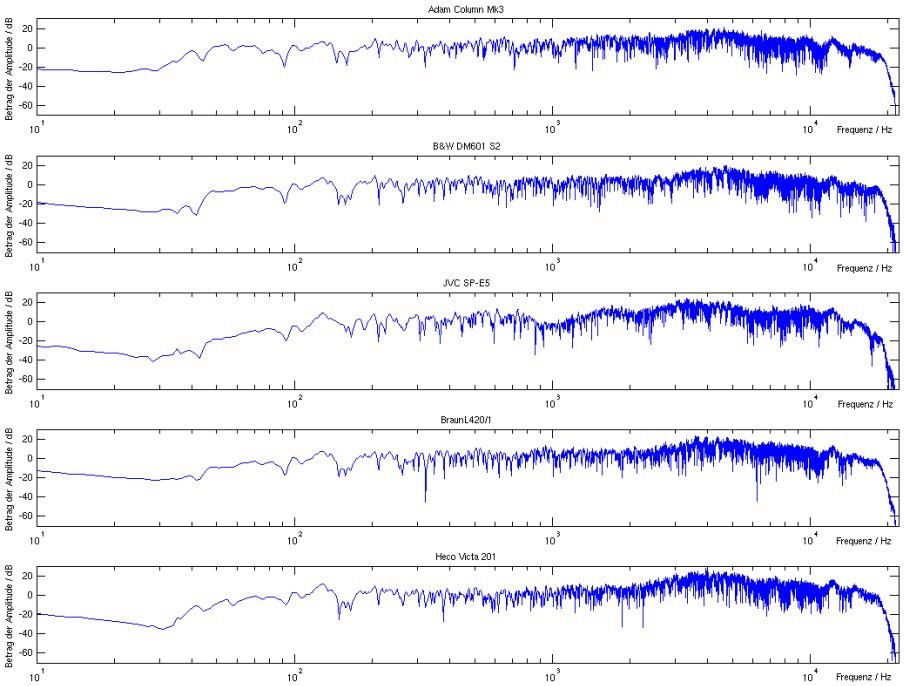


Abbildung 3.6: Übertragungsfunktion der jeweils linken Lautsprecher im Raum bei Messung mit dem Messroboter und einem Winkel von −30° (also frontalem Blick des Roboters auf den Lautsprecher), rechtes Ohr

Lautsprecher bis unter das Tuch auf den Drehtellern.
Abbildung 3.5 und 3.6 zeigen exemplarisch die aus den Impulsantworten des linken Lautsprechers für einen Winkel von −30° (der Messroboter schaut also genau auf den Lautsprecher) berechneten Übertragsungsfunktionen des Versuchsaufbaus für alle fünf Lautsprecher.

3.6 Audioinhalt

Es sollte versucht werden, im Versuch eine möglichst normale Abhörsituation für die Versuchspersonen herzustellen. Als Inhalt der von den Versuchspersonen zu beurteilenden Stimuli, also als das Audiomaterial, welches mit den BRIR gefaltet wird, sollte daher Audioinhalt eines Genres gewählt werden, das vielen Hörern einigermaßen vertraut ist. Gleichzeitig sollte dieses Signal in der Lage sein, Schwächen eines Lautsprechers gut aufzudecken und hörbar zu machen bzw. Stärken hervorzuheben, so dass die Versuchspersonen die Gelegenheit haben, die Unterschiede der fünf Lautsprechermodelle gut herauszuhören. Wie in 3.2 beschrieben

muss jede Versuchspersonen insgesamt 35 Stimuli bewerten, davon 30 akustische oder opto-akustische. Daher sollte auch darauf geachtet werden, dass das Signal eine zeitliche Dauer hat, bei der der Versuch nicht zu lang und anstrengend für die Teilnehmer wird.
Gewählt wurde nach diesen Überlegungen ein Ausschnitt aus dem Musikstück *No Sanctuary Here* des Gitarristen und Sängers *Chris Jones*. Es beinhaltet vor allem eine klar aufgenommene gut hörbare akustische Gitarre, die weitgehend frei von Effekten wie beispielsweise Verzerren ist, sowie vordergründigen männlichen Gesang in englischer Sprache. Weiterhin wird das Stück getragen durch einen Bass und einen männlichen Chor im Hintergrund sowie teilweise Percussions. Es wurde ein 1 Minute und 11 Sekunden dauernder Auszug aus dem Lied gewählt, der sowohl den tiefen Bass und Chor als auch ein Gitarrensolo in hohen Lagen sowie das Spiel der Percussions und das akzentuierte Zupfen der Gitarre gut hervorhebt. Somit ergibt sich ein Ausschnitt, der ein breites Frequenzspektrum abdeckt und über transientenreiche Teile verfügt. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die meisten Versuchspersonen dieses Stück möglichst unvoreingenommen hören, da es erstens kein sehr bekanntes ist und zweitens einem Genre entstammt, welches bei wenigen Leuten auf gänzliche Ablehnung stößt.
Aufgrund der genannten Tatsache, dass die Gesamtdauer des Versuches möglichst kurz gehalten werden sollte, und gleichzeitig aber Effekte in den Bewertungen, die von unterschiedlichem Audio-Inhalt ausgehen, vermieden werden sollen, wurde kein weiterer Ausschnitt ausgesucht. Alle Personen im Versuch hörten also jedes Mal den gleichen 1:11-minütigen Teil dieses Stückes.

3.7 Erhebungsinstrument

Die zu erhebenden Daten, also die Eindrücke der Versuchspersonen, wurden mit Hilfe eines semantischen Differentials erfasst. Das von Osgood [25] entwickelte semantische Differential ist eine Technik zum Erfassen von Beurteilungen über unterschiedlichste Objekte, von Osgood *Konzepte* genannt, und deren Eigenschaften. Zumeist wird mithilfe des semantischen Differentials die konnotative Verbindung eines Begriffes zu dem Objekt abgefragt, also die, die eine subjektive Assoziation des Bewertenden gegenüber dem Objekt beinhaltet. Es können jedoch auch denotative Bedeutungen erfasst werden.
Das semantische Differential besteht aus einer Liste von begrifflichen Gegensatzpaaren. Die Versuchspersonen sollen auf einer Skala bewerten, in welchem Maße ein dargebotener Stimulus den gegebenen Begriffen entspricht. Zur Bewertung

von akustischen Reizen und insbesondere der Qualität von akustischen Quellen hat sich die Datenerhebung durch ein semantisches Differential als gut geeignet erwiesen. Wilkens [26] untersuchte die wahrgenommene Güte von Lautsprechern sowohl in Paarvergleichen als auch mit Hilfe einer Liste von Gegensatzpaaren. Er fand hierbei eine hohe Korrelation der Ergebnisse, was nahelegt, das Verfahren des Paarvergleichs, das zeitaufwendiger ist, zu Gunsten einer Bewertung von einzelnen Lautsprechern, z.B anhand eines semantischen Differentials, fallen zu lassen.
Osgood weist darauf hin, dass die Relevanz der abgefragten Gegensatzpaare für den untersuchten Gegenstand von großer Wichtigkeit ist [25, S. 77-80]. Im folgenden Abschnitt 3.8 wird erläutert welche Attribute für die Skale dieses Hörversuches ausgewählt wurden.

3.8 Skalenkonstruktion

Die Attribute, deren Bewertung durch das semantische Differential erfasst werden, lassen sich bezüglich ihrer Reizmodalität in drei Kategorien einteilen. So werden rein auditive (unimodal), rein visuelle (unimodal) und audiovisuelle (multimodal) Eindrücke abgefragt.
Die Auswahl der Eigenschaften und dazugehörigen Gegensatzpaare für die akustischen Merkmale und somit auditiven Bewertungen ist orientiert an Empfehlungen für Attribute zur Bewertung der Qualität für Lautsprecher. Wilkens [26] fand in seinen Untersuchungen zur subjektiven Bewertung von Lautsprechern eine hohe Korrelation vieler von ihm benutzter Attribute und konnte durch eine Faktorenanalyse mit *Schärfe* und *Volumen* vor allem zwei für eine Lautsprecherbewertung wichtige Faktoren herausarbeiten.
Weitere Untersuchungen zu geeigneten Skalen führten Gabrielsson und Sjögren [27] sowie Gabrielsson und Lindström [28] durch. Sie konnten in mehreren Versuchen 8 Attribute identifizieren, durch die gute oder schlechte Klangqualität beschrieben wird. Die gleichen Attribute werden anhand dessen auch von Toole [29] zur Qualitätsbewertung von Lautsprechern empfohlen. Die für den Versuch ausgewählten Gegensatzpaare zur Beschreibung der Klangqualität orientieren sich daher an den genannten Vorschlägen.
Die visuelle Wahrnehmung von Lautsprechern ist bislang nur wenig erforscht, weshalb das Finden von geeigneten Attributen zur Beschreibung von optischer Qualität weitaus schwieriger ist. Es wurden hier Attribute ausgewählt, die sich jeweils unimodal sowohl auf den auditiven als auch den visuellen Reiz anwenden lassen (wie z.B. *Helligkeit*). Es werden zudem gegenüber der auditiven Modalität deut-

lich weniger visuelle Eindrücke abgefragt, da die Versuchspersonen im Versuch gut nachvollziehen können, dass sie die optischen Eigenschaften desselben Lautsprechers mehrmals bewerten sollen.
Die audiovisuellen Attribute fragen die Bewertung eines der strukturellen Merkmale der Boxen ab. Die *Größe* ist vielleicht das markanteste unter diesen und für Personen meist klar definiert. Hinzu kommt die Abschätzung einer *Wertigkeit* oder eines *Preises* sowie der Eindruck der *Gesamtqualität* des Lautsprechers.
Jede der Eigenschaften sollte von den Versuchspersonen auf einer fünfstufigen Skala bewertet werden. Die einzelnen Stufen waren im Versuch weder mit Zahlen noch mit Begriffen beschriftet. Osgood empfiehlt, die Polarität der Skalen innerhalb eines Versuches zu variieren, also die mit positiver Ausprägung assoziierten Adjektive auf manchen Skalen der linken und auf manchen der rechten Seite zuzuordnen [25, S. 81-82]. Dies wurde auf dem Fragebogen des Versuches berücksichtigt (z.B. *natürlich* - *künstlich*, aber *schlecht* - *gut*). Für die spätere Auswertung wurde die Polarität aus Gründen der Übersichtlichkeit wieder einheitlich gestaltet.

Tabelle 3.3: Attribute und Gegensatzpaare des Semantischen Differentials gruppiert nach Modalität; die Spalte *Stimuli* gibt an, bei welchen Stimuli, die entsprechende Gruppe von Attributen abgefragt wurde, die Polarität der Skalen ist wechselhaft

Modalität	Stimuli	Attribut	Gegensatzpaar
auditiv	akustisch,	Höhen	viel Höhen - wenig Höhen
	optoakustisch	Tiefen	viel Tiefen - wenig Tiefen
		Härte	weich - hart
		Volumen	voluminös - schlank
		Lautheit	leise - laut
		Klarheit	klar - verschwommen
		Natürlichkeit	natürlich - künstlich
		Klangqualität	schlecht - gut
visuell	optisch,	Helligkeit	hell - dunkel
	optoakustisch	Aussehen	schlecht - gut
audiovisuell	akustisch, optisch,	Größe	klein - groß
	optoakustisch	Wert	teuer - billig
		Gesamtqualität	schlecht - gut

Tabelle 3.3 zeigt eine nach ihrer Modalität sortierte Liste aller verwendeten Gegensatzpaare. Im folgenden wird für jedes Gegensatzpaar eine kurze Erläuterung gegeben. Eine detailliertere Beschreibung einzelner Attribute findet sich beispielsweise bei Gabrielsson und Sjögren [27], [28].

Höhen und Tiefen

Die auditiven Attribute *Höhen* und *Tiefen* sollen jeweils den Anteil der wahrgenommenen hohen bzw. tiefen Frequenzen im Gesamtsignal beschreiben.

Härte

Ob sich ein Signal für den Hörer hart oder weich anhört kann bespielsweise bestimmt sein durch Spitzen im Frequenzgang im Bereich der höheren Frequenzen oder einen insgesamt ansteigenden Frequenzgang nach oben hin. Flachere Frequenzgänge und stärkere Bässe führen zu eher weicher wirkenden Klängen. Weiterhin tragen viele Verzerrungen zu einem harten Eindruck bei [27].

Volumen

Ein voluminöser Eindruck wird vor allem hervorgerufen durch große Frequenzbreite. Auch der Lautstärkepegel kann eine Rolle spielen. Der Hörer erhält einen offenen, raumfüllenden und sehr präsenten Klang [27].

Lautheit

Leicht erkennbar fragt dieses Attribut den Hörer, als wie laut er einen Klang empfindet.

Klarheit

In einem klaren Signal sind viele Details z.B. der einzelnen Instrumente gut zu hören und identifizierbar. Im Gegensatz dazu stehen Klänge, bei denen einzelne Komponenten verschwimmen und so ein diffuses Klangbild erzeugen. Viel Verzerrungen und auch hohe Bassanteile können beispielsweise ein unklares Signal prägen [27].

Natürlichkeit

Natürlichkeit ist gegeben, wenn eine Wiedergabe wie eine unverfälschte Reproduktion, also wie das natürliche Original klingt. Auch hierzu können beispielsweise ein

minimaler Anteil an Verzerrungen oder ausgeglichene Frequenzgänge beitragen. Auch eine Bedeutung des verwendeten Audiomaterials ist hier gut vorstellbar, da Produktionen, die viele künstliche Effekte verwenden, zu einer unnatürlicheren Bewertung führen könnten [28].

Klangqualität

Die *Klangqualität* oder die auditive Qualität soll eine Zusammenfassung über die auditiven Bewertungen sein oder anders gesagt die Antwort auf die Frage „Wie klingt dieser Lautsprecher?".

Helligkeit

Unter dem visuellen Attribut *Helligkeit* sollen die Testpersonen angeben, als wie hell oder dunkel sie einen Lautsprecher empfinden. Sicherlich spielt die Farbe der Boxen und Membranen hier die entscheidende Rolle. Es ist aber auch denkbar, dass z.B. die Größe einen Einfluss hat.

Aussehen

Das *Aussehen* beschreibt die gesamte visuelle Qualität der Lautsprecher. Man könnte nach diesem Attribut fragen, indem man sagt: „Wie sieht dieser Lautsprecher aus?".

Größe

Das multimodale Attribut *Größe* soll erfassen, wie groß oder klein die Boxen empfunden werden. Einen Eindruck der *Größe* erhält man sowohl beim Sehen als auch beim Hören der Lautsprecher. Es kann also sowohl uni- als auch multimodal bewertet werden. Obgleich man vielleicht zunächst annehmen könnte, dass das Visuelle hier wichtiger sei, handelt es sich also um einen audiovisuellen Eindruck.

Wert

Den *Wert* sollen die Versuchsteilnehmer abschätzen anhand der Eigenschaften *teuer* und *billig*. Auch dieses Attribut kann unter der auditiven und der visuellen Bedingung bewertet werden. Es beschreibt eine modalitätsübergreifende Einschätzung und kann daher als supramodal bezeichnet werden.

Gesamtqualität

Das letzte Attribut erfasst die Gesamtqualität des Produktes also das im vorliegenden Zusammenhang abschließende Urteil einer Versuchsperson. Auch dieses Attribut ist supramodal.

3.9 Technischer Versuchsaufbau

Die technische Realisation des Hörversuches umfasst die akustische Simulation der einzelnen Lautsprecher, das Zeigen bzw. Nachvornestellen der jeweiligen Lautsprecher sowie die Erfassung der Antworten von den Versuchspersonen. Abbildung 3.7 gibt einen schematischen Überblick über den gesamten Aufbau. Dieser bestand im Wesentlichen aus einem Simulationsrechner, einem Subwoofer, dem Kopfhörer und dem Headtracker für die akustische Simulation, einem Versuchslaptop, an dem die Versuchspersonen ihre Bewertungen abgeben, den zwei Drehtellern, auf denen die Lautsprecher standen, sowie deren Steuergeräte, die wiederum von zwei Laptops aus gesteuert wurden. Alle verwendeten Rechner waren an einen gemeinsamen Router angeschlossen und gehörten somit einem Netzwerk an. Sie konnten daher leicht untereinander kommunizieren. Der Versuchslaptop erfasste die Daten der Teilnehmer und wies jeweils den Simulationsrechner an, den nächsten Stimulus zu starten. Dieser gab dann wiederum Befehle zu den zwei Laptops für die Drehteller, damit diese zunächst auf die richtige Position gedreht wurden. War dies erfolgt, meldeten die Drehteller-Laptops dies an den Simulationsrechner und dieser startete gegebenenfalls die aktuell gewünschte akustische Simulation.
Im folgenden werden die einzelnen Teile des Aufbaus näher erläutert.

3.9.1 Datenerfassung

Die Erfassung der Antworten der Versuchspersonen erfolgte mit der frei verfügbaren Software *LimeSurvey*[1]. Die Software bietet eine einfache Möglichkeit, die benötigten Fragebögen als eine Webanwendung im gewünschten Layout zu erstellen, in der gewünschten Abfolge zu präsentieren und die Daten elektronisch zu erheben. Auf einem Versuchslaptop wurde hierzu der Webserver *Apache*[2] installiert, unter dem das Webprogramm *LimeSurvey* lief und anschließend über die grafische Administrator-Oberfläche in einem Webbrowser konfiguriert werden konnte. Im Versuch gaben die Versuchspersonen all ihre Antworten ebenfalls über die Web-

[1] Carsten Schmitz et al., http://www.limesurvey.org/
[2] Apache Software Foundation, http://www.apache.org/

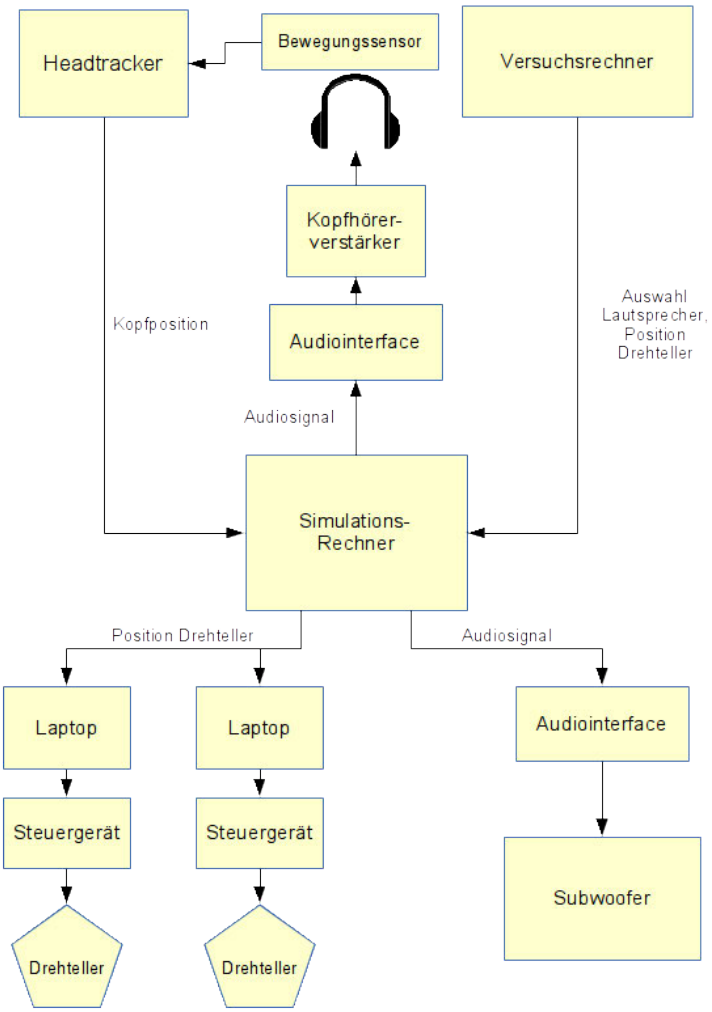


Abbildung 3.7: Schematischer technischer Aufbau während des Hörversuches

Schnittstelle. Beispiele der einzelnen Frageseiten finden sich in Anhang D.
Für alle verschiedenen Versuchsteile (rein akustisch, rein optisch und optoakustisch) wurden in *LimeSurvey* Frageseiten mit den entsprechenden Attributen erstellt. So ist sichergestellt, dass die Versuchspersonen jeweils nur die gerade passenden Attribute zu sehen bekommen. Jede Seite lässt sich in *LimeSurvey* einer Randomisierungsgruppe zuordnen. Innerhalb einer solchen Gruppe werden die einzelnen Seiten dann in zufälliger Reihenfolge angezeigt. Gleichzeitig lassen sich die Gruppen in eine beliebige bestimmte Reihenfolge bringen. In diesem Fall wurde also jeweils eine Gruppe für den rein akustischen, rein optischen und den optoakustischen Teil des Versuches erstellt. Hiermit lässt sich so sehr leicht die im Versuch gewünschte Abfolge der Stimuli (zunächst akustisch, dann optisch, dann

optoakustisch, siehe 3.10) erreichen. Zwischen diesen Gruppen wurde jeweils eine Pause-Seite eingefügt, die den Versuchspersonen den Beginn des nächsten Abschnitts ankündigt.
Jede einzelne Seite enthält nun ein semantisches Differential mit den zur aktuellen Gruppe und damit dem aktuellen Stimulus passenden Gegensatzpaaren und der fünfstufigen Skala. Jede Skala wurde als ein Pflichtfeld implementiert, sodass die nächste Seite und somit der nächste Stimulus nur geladen werden konnten, wenn jedes Attribut bewertet worden war. Es gab keinen voreingetragenen Standardwert. Sind alle Skalen ausgefüllt, kann der nächste Stimulus durch einen Klick auf einen *Weiter*-Button gestartet werden. Dies ist unabhängig davon, ob noch ein akustischer Stimulus läuft oder nicht. Es war den Versuchspersonen also möglich, die akustische Simulation zu verkürzen, wenn sie bereits alle Skalen ausgefüllt hatten. Ein mehrfaches Hören eines Stimulus war nicht möglich.
Beim Laden einer jeden Frageseite wurden Nachrichten im *Open Sound Control*[3] (OSC) Format an den Simulationsrechner geschickt. Diese enthielten Anweisungen zum Stoppen des aktuellen akustischen Stimulus, falls dieser noch lief, die Auswahl des kommenden akustischen Stimulus, also die Auswahl der als nächstes zu benutzenden BRIR, sowie die Auswahl des kommenden optischen Stimulus, also die Information, in welche Position der linke und der rechte Drehteller gestellt werden müssen. Um das Senden dieser Nachrichten von den *LimeSurvey*-Seiten aus einfach möglich zu machen, wurde das Software-Tool *osc-web* (*Open Sound Control Web Bridge*)[4] verwendet. Es handelt sich um ein in *JavaScript*[5] geschriebenes Programm, welches auf der *Node.js*[6]-Platform einen OSC-Server und -Client implementiert, über die in Webseiten eingebundene Skripte leicht OSC-Nachrichten verschicken oder empfangen können. In jede Fragebogen-Seite wurde hierzu der in Anhang D.3 zu sehende Code eingefügt. Dieser sendet bei gleichzeitigem Laufen des *OSC-Web-Bridge*-Servers beim Laden der Seite OSC-Nachrichten an den Simulationsrechner, die die Wiedergabe des vorherigen Stimulus stoppen, die richtigen BRIR für den nächsten Stimulus auswählen, die abzuspielende Audiodatei auswählen, sowie die Gradzahlen angeben, auf die der rechte und linke Drehteller gestellt werden müssen.

[3] http://opensoundcontrol.org/
[4] automata, http://automata.cc/osc-web/
[5] Netscape Communications Corporation, Mozilla Foundation
[6] Ryan Dahl, http://nodejs.org/

3.9.2 Akustische Simulation

Das Berechnen der akustischen Simulation der Lautsprecher geschah auf dem Simulationsrechner. Außerdem sorgte dieser Rechner für die zeitliche Koordination zwischen Abspielen der Simulation und dem Drehen der Teller. Auf dem Rechner lief der Soundserver *Jack*[7], der das Routing der Signale zwischen den einzelnen Komponenten organisierte. Zudem lief hier ein Programm (Patch) in der Programmiersprache *Pure Data* (Pd)[8], welches vor allem den Ablauf des Versuches steuerte, das heißt, die Informationen zum Drehen der Teller, zum Abspielen der Simulation und zur Kopfposition der Versuchspersonen zusammentrug und an jeweils andere Komponenten verteilte. Der *Pd*-Patch wurde bereits für vorhergehende Projekte am Fachbereich verwendet und für diesen Versuch teilweise verändert und angepasst. Vor allem musste hier eine Routine implementiert werden, die mit der Wiedergabe eines akustischen Stimulus so lange wartet, bis die Steuerungsrechner der Drehteller melden, dass die Drehung vollendet ist (s. 3.9.3).
Abbildung 3.8 zeigt schematisch den Fluss der Audiodaten zwischen den verschiedenen Komponenten der Simulation. Die eigentliche Faltung des Quellsignals mit den BRIR der Lautsprecher geschieht mithilfe der am Fachbereich Audiokommunikation entwickelten Software *fwonder*. Diese verarbeitet ein Audiosignal, die BRIR sowie die Positionsdaten des Headtrackers und berechnet daraus das binaurale Ausgangssignal in Echtzeit. Bereits vor Beginn jedes Versuchsdurchlaufes wurde pro Lautsprecher eine *fwonder*-Instanz gestartet, um somit ein schnelles Umschalten zwischen den einzelnen simulierten Lautsprechermodellen zu ermöglichen. Wie bereits in 3.9.1 beschrieben empfängt *PureData* die Informationen über den aktuell zu simulierenden Lautsprecher vom Versuchslaptop. Anschließend muss der *PureData*-Patch also nur noch die Ausgabe des Quellsignals auf die aktuell benötigte *fwonder*-Instanz umschalten, wenn ein neuer Lautsprecher für die Simulation ausgewählt wurde.
Innerhalb des *PureData*-Patches lassen sich Pegelanpassungen für jeden einzelnen Lautsprecher vornehmen. Alle Lautsprecher wurden hier in der Lautheit aneinander angepasst.

Die Simulation des *Adam Column Mk3* konnte den Klang der Lautsprecher nicht ausreichend originalgetreu wiedergeben, da der Lautsprecher auch in tiefen Frequenzen von unter ca. $60Hz$ noch deutlich hörbare Signale erzeugt, das Übertragungsverhalten des verwendeten Kopfhörers in diesen Frequenzbereichen jedoch zu sehr absinkt. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu der Wiedergabe

[7] Paul Davis et al., http://jackaudio.org/
[8] Miller Puckette et al., http://puredata.info/

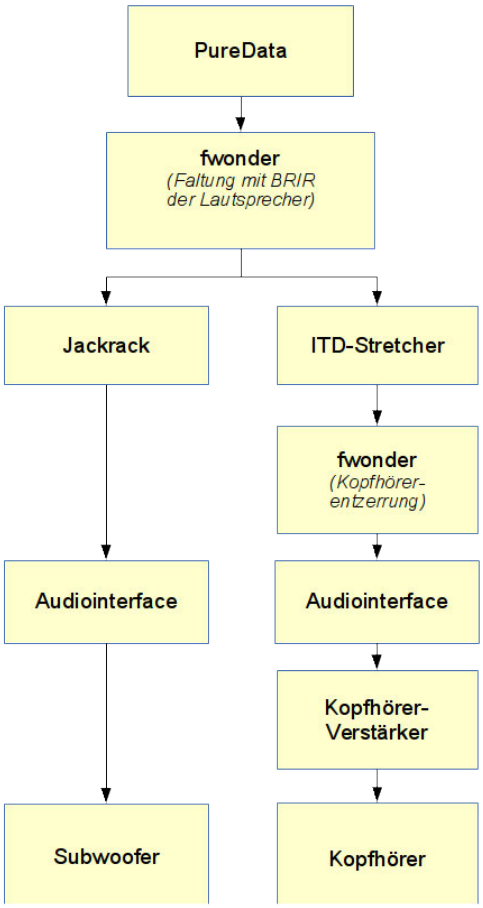


Abbildung 3.8: Weg der Audiodaten in der akustischen Simulation

über die Kopfhörer ein Subwoofer verwendet, der in einer Ecke des Raumes hinter den anderen Lautsprechern platziert wurde. So war er für die Versuchspersonen nur schwer zu sehen und es konnten keine eventuellen Luftstöße durch die Membranbewegungen von den Teilnehmern bemerkt werden. Der Subwoofer war somit nicht offensichtlich als aktiv am Versuch beteiligte Komponente erkennbar und eine akustische Lokalisation der Box war aufgrund der nur tiefen wiedergegebenen Frequenzen nicht möglich. Da es das Ziel bei der Verwendung des Subwoofers war, die tieffrequenten Anteile der Signale wiederzugeben, jedoch nur bis zu dem Punkt im Frequenzspektrum, an dem die Kopfhörer dies wieder übernehmen können, und gleichzeitig auch der Pegel des Signals für den Subwoofer so angepasst werden musste, dass er an der Position der Versuchspersonen zum Pegel des Simulationsteils der Kopfhörer passt, wurde das Ausgangssignal von *fwonder*, also das mit den BRIR gefaltete Signal, an die Software *JACKRack*[9] geschickt. *JACKRack* bietet

[9]Bob Ham et al., http://jack-rack.sourceforge.net/

eine leichte Möglichkeit, ein Audiosignal durch verschiedene Plugins zu schicken. Innerhalb von *JACKRack* wurden ein Verstärker (*Simple Amplifier*[10]), ein parametrischer Equalizer (*Triple band parametric with shelves*[10]), ein Tiefpassfilter (*Low Pass Filter (One Pole)*[11]) und ein Delay (*Echo Delay Line (Maximum Delay 0.1s)*[11]) verwendet. In mehreren vergleichenden Messungen wurden diese Plugins so eingestellt, dass schließlich ein Subwoofer-Signal entstand, das vor allem im Pegel sowie auch zeitlich das Kopfhörersignal ergänzt und einen guten Übergang zu diesem und somit eine gute Nachbildung auch der tieffrequenten Bereiche garantiert. Das für den Subwoofer aufbereitete Signal wurde schließlich über eine *RME FireFace 400* Soundkarte ausgegeben und an den aktiv betriebenen Subwoofer gesendet.

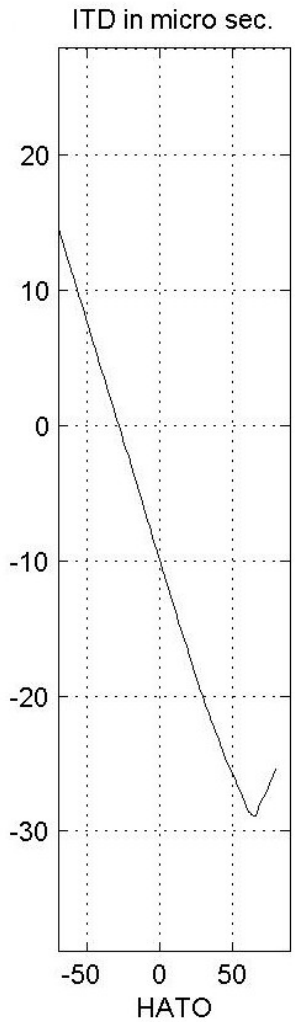


Abbildung 3.9: Interaurale Laufzeitdifferenz (in ms) bei der Messung des einen *Adam*-Lautsprechers für die verschiedenen Winkel (in Grad)

Alle *fwonder*-Instanzen waren weiterhin mit Instanzen des Programmes *stretcher* verbunden. Diese Software wurde ebenfalls am Fachbereich Audiokommunikation entwickelt und realisiert eine Individualisierung der Simulation, indem es den Ohrabstand eines Hörers berücksichtigt und daraus eine interaurale Laufzeitdifferenz (*Interaural Time Difference*, ITD) berechnet. Vor der Simulation wurde dafür die ITD aus den binauralen Impulsantworten extrahiert und rausgerechnet, um sie anschließend der des Hörer anzupassen. Die Simulation wird somit verbessert, indem

[10]Steve Harris, http://plugin.org.uk/ladspa-swh/docs/ladspa-swh.html
[11]Richard Furse et al., http://www.ladspa.org/cmt/plugins.html

sie dem Ohrabstand der Versuchsperson und somit den Erfahrungen des Gehörs der Personen gerecht wird. Vor Beginn des Versuches wurde hierzu der Ohrabstand aller Versuchsteilnehmer gemessen und anschließend vom *PureData*-Patch an die Stretcher-Software geschickt. Abbildung 3.9 zeigt beispielhaft die Laufzeitdifferenzen über den Winkel des Kopfes für den einen Adam Lautsprecher.
Nach den *stretcher*-Instanzen durchlief das Audio-Signal erneut die Faltungssoftware *fwonder*. Bei diesem Durchlauf wurde das Programm so konfiguriert, dass es den Frequenzgang der Kopfhörer entzerrte, um eine Färbung der Simulation durch das Übertragungsverhalten der Kopfhörer auszuschließen.
Nach dem Durchlaufen aller beschriebenen Programme wurde das Audiosignal über eine *M-Audio Audiophile 192*-Karte ausgegeben und an den Kopfhörerverstärker gesendet.

3.9.3 Drehteller

Die zwei Drehteller wurden betrieben von ihren Steuergeräten, welche jeweils über eine serielle Schnittstelle mit einem Laptop verbunden waren. Auf beiden Rechnern lief die Software *Matlab*[12]. Am Fachbereich Audiokommunikation waren bereits *Matlab*-Funktionen zum Kommunizieren mit den Steuergeräten und somit dem Steuern der Drehteller vorhanden (siehe Anhang E.1, E.2). Mittels der Funktionen lassen sich die Teller einfach von einem Rechner aus auf jede beliebige Position stellen. Die kleinste Schrittgröße ist hierbei $2,5°$. Die Funktion *move_turntable* wurde so erweitert, dass die Teller sich nicht immer in die gleiche Richtung drehen, um die gewünschte Position zu erreichen, sondern stets den kürzesten Weg nehmen. Hiermit konnte die Wartezeit zwischen den einzelnen Stimuli verkürzt werden. Die längste mögliche Drehdauer betrug somit in etwa 25 Sekunden.
Vor dem Versuch wurden die Teller jeweils mittels der Funktion *setup_rightTable* bzw. *setup_leftTable* zurückgesetzt und in *Matlab* UDP-Objekte (*User Datagram Protocol*) erstellt, die die in 3.9.2 genannten OSC-Daten vom Simulationsrechner empfangen konnten. Eine Callback-Funktion *outline_callback.m* (siehe Anhang E.4), die durch das Eintreffen eines Datenpaketes aktiviert wird, leitete die empfangenen Werte schließlich an die Steuergeräte der Drehteller weiter, indem sie die oben genannte Funktion *move_turntable* aufruft. Diese Funktion gibt den Wert 1 zurück, sobald die Drehung des Tellers vollendet ist. Somit kann vom *Pd*-Patch am Simlulationsrechner wiederum die Nachricht empfangen werden, dass der Teller bereit und in der richtigen Position ist. Trifft diese Information ein, startet der

[12] The MathWorks, http://www.mathworks.com/products/matlab/

Patch die akustische Simulation des aktuellen Stimulus.

3.10 Durchführung

Der Ablauf des Versuchs sah vor, den Versuchspersonen zunächst die rein akustischen Stimuli zu präsentieren, sie also die Lautsprecher nur hören jedoch nicht sehen zu lassen, dann rein optische Stimuli zu erzeugen, also die Lautsprecher nur zu zeigen, ohne über die akustische Simulation Klangbeispiele abzuspielen und schließlich die optoakustischen Stimuli zu präsentieren. Diese Reihenfolge stellt sicher, dass die Teilnehmer beim rein auditiven Bewerten noch nicht vom Aussehen der Lautsprecher beeinflusst sind. Da sie beim ersten Hören noch keine Boxen sehen können, ist auch für die anschließende rein visuelle Bewertung kein einfaches Zuordnen der vorher gehörten Klangbeispiele zu den optisch gezeigten Boxen möglich. Innerhalb jeder dieser drei Gruppen wurden die Stimuli randomisiert dargeboten (siehe 3.9.1).

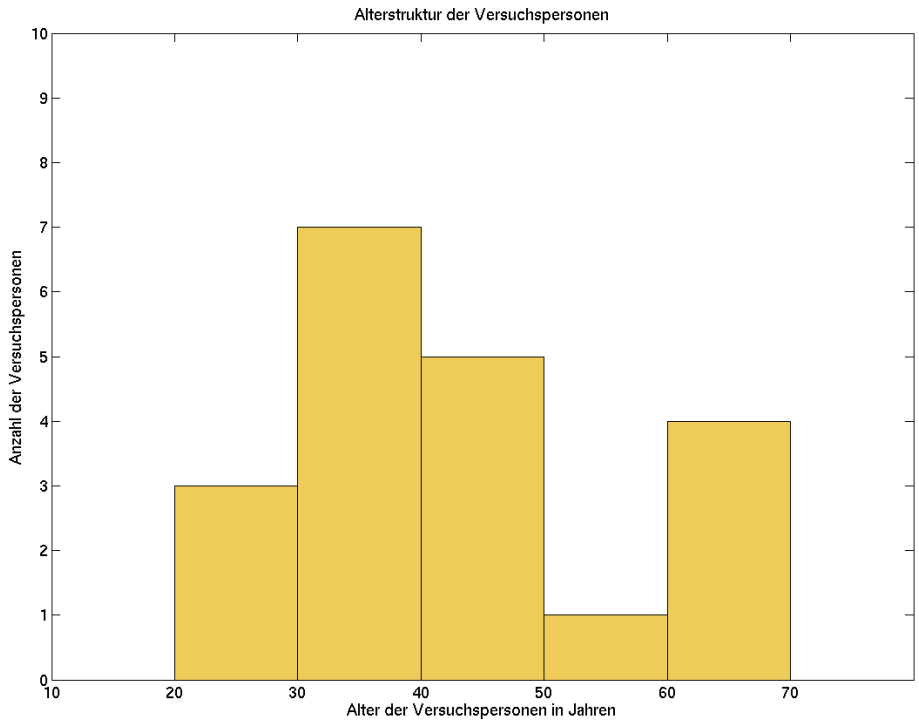


Abbildung 3.10: Altersstruktur der Versuchspersonen

An dem Versuch nahmen insgesamt 20 Personen deutscher Staatsbürgerschaft

im Alter von 24 bis 64 Jahren teil (siehe Abb. 3.10). Hiervon waren 13 männlich und 7 weiblich. Bis auf eine Person waren nach eigenen Angaben alle normal hörend. Eine Person litt unter Tinnitus nach einem Knalltrauma. Keine der Versuchspersonen gab an, beruflich aktuell oder in der Vergangenheit auf einem akustischen Feld tätig zu sein oder gewesen zu sein. 8 Personen waren Freizeitmusiker. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass es sich um keine Experten auf dem untersuchten Gebiet handelte.

Jede Versuchsperson erhielt zunächst eine Einführung in den Versuch durch den Versuchsleiter. Hierin wurden die Versuchspersonen mit dem durch sie auszufüllenden semantischen Differential sowie deren Attributpaaren vertraut gemacht. Nach einem Durchsehen der Gegensatzpaare hatten die Teilnehmer Gelegenheit, den Versuchsleiter nach der Bedeutung dieser zu fragen, sofern sie sich unter einigen der Adjektive nichts vorstellen konnten. Weiterhin wurde ihnen vom Versuchsleiter der Ablauf des Versuchs geschildert, so dass die Personen wussten, dass sie verschiedene Lautsprecher nach Klang, Aussehen und allgemein bewerten sollten. Sie wurden auch darauf hingewiesen, dass es keine richtigen und oder falschen Antworten gibt, sondern nur ihre persönliche Meinung gefragt ist, sowie auf die Tatsache, dass sie immer nur die Attribute der Modalitäten bewerten müssen, über die sie aktuell auch die Lautsprecher wahrnehmen (also z.B. keine auditiven Attribute bei rein optischen Stimuli) und dass sie stets alle möglichen Attribute bewerten müssen, bevor der nächste Stimulus dargeboten wird. Vor Beginn des Versuches erhielten die Teilnehmer einen Fragebogen mit Fragen zu ihrer Person sowie als Beispiel eine Testseite mit dem semantischen Differential, auf dem alle möglichen Attribute aufgezeigt waren.

Nach allen Erklärungen zum Versuch bekamen die Versuchspersonen den Kopfhörer aufgesetzt und die Nullposition des Headtrackers wurde festgesetzt, indem die Personen geradeaus auf einen markierten Punkt an der Wand schauten. Soll man Klang und Aussehen von Lautsprechern bewerten, erscheint es nicht sinnvoll, dass man dazu einen Kopfhörer trägt. Um dies dennoch zu rechtfertigen und den Versuchspersonen gleichzeitig nicht zu verraten, dass sie nur eine Simulation der Lautsprecher hören, wurde ihnen gesagt, dass sie neben den unterschiedlichen Lautsprechern auch die Kopfhörer auditiv bewerten sollen. Hierzu wurde vor allen anderen Stimuli dreimal das reine ungefaltete Quellsignal über die Kopfhörer wiedergegeben und von den Personen bewertet. Die Personen waren darüber in Kenntnis gesetzt, dass die Stimuli grundsätzlich in folgender Reihenfolge dargeboten werden: Kopfhörer, Lautsprecher rein akustisch, Lautsprecher rein optisch, Lautsprecher optoakustisch. Es wurde ihnen jedoch gesagt, dass es möglich sei,

dass auch später noch einmal ein Signal über die Kopfhörer abgespielt werde, weswegen sie die Kopfhörer den ganzen Versuch über aufbehalten müssten.
Weiterhin wurde den Personen angekündigt, dass sie jeden Lautsprecher mehrmals hören würden und es aufgrund von unterschiedlichen verwendeten elektroakustischen Einstellungen sein könne, dass der selbe Lautsprecher jedes Mal anders klinge. Daher sollten sie versuchen, jedes Mal neu hinzuhören bzw. zu sehen und zu bewerten.
Um die rein auditive Bewertung der Lautsprecher zu ermöglichen, waren die Lautsprecher zu Beginn des Versuchs mit Stofftüchern abgedeckt. Die Personen konnten sie daher nicht sehen. Nach den fünf rein akustischen Stimuli wurden die Personen daher gebeten, eine kurze Pause zu machen, bis der Versuchsleiter die Abdeckungen entfernt hatte.

4 Auswertung

Nach Beendigung des praktischen Hörversuches wurden alle erfassten Daten aus *LimeSurvey* exportiert und mit Hilfe der kommerziellen Programme *Matlab*[1] und *SPSS*[2] ausgewertet.
Zunächst wurden die Daten auf Fehler hin überprüft und für die weitere Verarbeitung aufbereitet und sortiert. Aufgrund der Tatsache, dass es den Versuchspersonen nicht möglich war, während des Versuches von einem zum nächsten Stimulus zu wechseln, ohne vorher alle Skalen bewertet zu haben, gab es keine fehlenden Werte. Das Attribut *Größe* wurde für zwei Stimuli von allen Versuchspersonen gleich bewertet. Dies betrifft im Kopräsenz-Paradigma den Fall der rein optischen Präsentation des *Adam*-Lautsprechers und im Konfliktreiz-Paradigma den Stimulus, in dem *B&W* akustisch und ebenfalls *Adam* optisch präsentiert wurde. In beiden Fällen wurde die Größe von allen Versuchsperson maximal bewertet. Das *Adam*-Modell ist als einziger Standlautsprecher auch der mit den größten physikalischen Abmessungen im Versuch gewesen und es lässt sich hier bereits leicht erahnen, dass das Sehen dieser größeren Box hier eventuell den akustischen Eindruck überdecken könnte. Wie sich später zeigen wird, geht dies einher mit den Bewertungen der anderen Lautsprecher. Da die Ergebnisse hier sehr eindeutig sind, und zur Vereinfachung der weiteren Rechnung wurde daher der Wert für diese zwei Fälle minimal um $0,01$ verringert.
Formal finden sich bei einigen perzeptiven Merkmalen unter manchen Bedingungen Ausreißer. Dies ist insbesondere aufgrund der gewählten fünfstufigen Skalen erwartungsgemäß. Die entsprechenden Variablen wurden jeweils einzeln angesehen. Es fand sich hierbei kein Fall mit Werten, die inhaltlich als eindeutig falsch oder unwahr klassifiziert werden können. Es wurde daher kein weiterer Wert gelöscht oder verändert.
Vorbereitend für das weitere Verfahren wurden alle abhängigen Variablen unter jeder Bedingung mit Hilfe eines Kolmogorov-Smirnov-Tests und eines Shapiro-

[1] The MathWorks, http://www.mathworks.com/products/matlab/
[2] IBM Corporation, http://www.ibm.com/software/analytics/spss/

Wilk-Tests auf Normalverteilung hin überprüft. Diese Tests sind für die meisten der Variablen signifikant, was auf eine Verletzung der Annahme einer Normalverteilung hinweist. In diesen Fällen wurde auf die grafische Verteilung in Histogrammen und Q-Q-Diagrammen geschaut (*Quantil-Quantil-Diagramm*). Es zeigte sich hier, dass die meisten Variablen annähernd normalverteilt sind. Neuere Studien zeigen zudem, dass Verfahren wie die Varianzanalyse sehr robust gegenüber derartigen Verletzungen sind ([30], [31]). Es wird daher später in allen Fällen trotz der Verletzung eine Varianzanalyse durchgeführt. In Fällen, wo nur schwach signifikante Ergebnisse erhalten werden, wird zusätzlich ein Friedman-Test durchgeführt.
Für die Auswertung wurde die in 3.8 beschriebene uneinheitliche Polarität der Skalen zur besseren Übersicht wieder aufgehoben. Es sind im Weiteren also stets die größeren, positiveren Bewertungen eines Attributes stets auf der rechten Seite einer Skala zu finden und entsprechen somit höheren Werten. 4.1 zeigt die Liste der Attribte aus 3.8 mit der nun sortierten Polarität.

Tabelle 4.1: Attribute und Gegensatzpaare des Semantischen Differentials gruppiert nach Modalität; die Spalte *Stimuli* gibt an, bei welchen Stimuli, die entsprechende Gruppe von Attributen abgefragt wurde, die Polarität der Skalen ist einheitlich, die Skalen werden also von links nach rechts immer größer oder positiver im Sinne des entsprechenden Attributes

Modalität	Stimuli	Attribut	Gegensatzpaar
auditiv	akustisch,	Höhen	wenig Höhen - viel Höhen
	optoakustisch	Tiefen	wenig Tiefen - viel Tiefen
		Härte	weich - hart
		Volumen	schlank - voluminös
		Lautheit	leise - laut
		Klarheit	verschwommen - klar
		Natürlichkeit	künstlich - natürlich
		Klangqualität	schlecht - gut
visuell	optisch,	Helligkeit	dunkel - hell
	optoakustisch	Aussehen	schlecht - gut
audiovisuell	akustisch, optisch,	Größe	klein - groß
	optoakustisch	Wert	billig - teuer
		Gesamtqualität	schlecht - gut

Kodiert sind alle Variablen mit den Werten -2 bis 2. Der kleinste oder negativste Wert auf einer Skala entspricht also dem Wert -2, der größte oder positivste dem Wert 2.

4.1 Kopräsenz-Paradigma

Im Kopräsenz-Paradigma sind wie bereits erklärt alle Stimuli enthalten, die keinen Konfliktreiz herstellen. Es werden hier die zwei Faktoren Modalität (3 Faktorstufen) und Lautsprecher (5 Faktorstufen) variiert.
Für alle abhängigen Variablen wurden zunächst Mittelwerte berechnet und damit zum Veranschaulichen der Daten Polaritätsprofile für alle Lautsprecher und alle Modalitäten erstellt. Diese geben einen guten Überblick über die erfassten Bewertungen und einige Dinge fallen beim Betrachten der Profile ins Auge. Die Profile für den Lautsprecher *B&W* und für die auditive Modalität seien hier exemplarisch abgebildet (Abbildungen 4.1 und 4.2). Profile für die anderen Lautsprecher sowie die Modalitäten finden sich im Anhang.

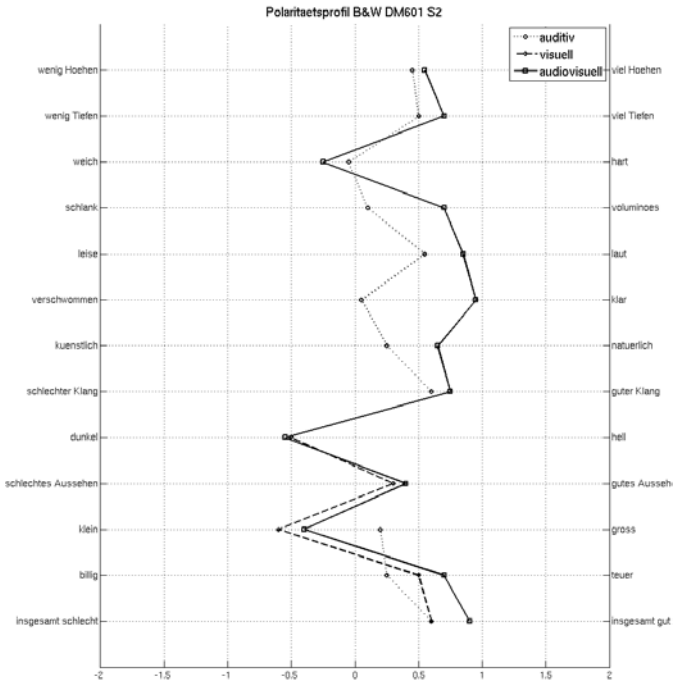


Abbildung 4.1: Polaritätsprofil des *B&W DM601 S2* im Kopräsenz-Paradigma

Der Wechsel der auditiven zur audiovisuellen Modalität scheint größere Verän-

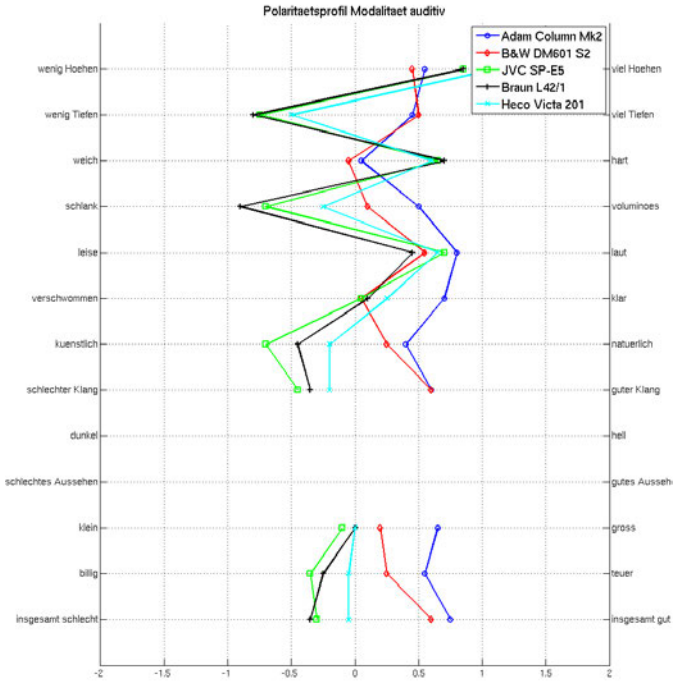


Abbildung 4.2: Polaritätsprofil für die Modalität *auditiv* im Kopräsenz-Paradigma

derungen hervorzurufen als der vom Visuellen zum Audiovisuellen. Die Graphen für die Modalitäten sind in den Polaritätsprofilen der Lautsprecher für die Attribute *Helligkeit* und *Aussehen* (oder *visuelle Qualität*) meist sehr nah beieinander. Die Bewertungen dieser visuellen Attribute ändern sich also kaum, wenn der Lautsprecher nicht nur gesehen sondern auch gehört wird. Bei den auditiven und audiovisuellen Attributen sind hingegen Unterschiede zwischen den Modalitäten erkennbar. Diese sind bei manchen Lautsprecher mehr (z.B. *Braun*) und bei manchen weniger stark ausgeprägt (z.B. *JVC*).

In den Profilen der einzelnen Modalitäten lässt sich für die auditive Bedingung sehen, dass die Kurven der beiden beiden Lautsprecher *Adam* und *B&W* meist nah beieinander liegen. Die anderen Modelle, insbesondere *JVC* und *Braun*, sind auch ähnlich bewertet worden, liegen jedoch mitunter weiter entfernt von den beiden ersten. Hier ist die bei der Auswahl der Lautsprecher (s. 3.3) genannte *akustische Qualität* zu sehen.

In den visuellen und audiovisuellen Attributen sind die einzelnen Lautsprecher alle sehr unterschiedlich bewertet worden. Interessant ist, dass die Versuchspersonen bei visuellen und teilweise den audiovisuellen (*Größe*) Attributen die Skala an-

scheinend viel weiter ausgenutzt haben, als bei den auditiven. Es sind also hier Werte vorhanden, die öfter weit vom Mittelpunkt, dem Wert 0, entfernt liegen. Dies könnte eventuell daran liegen, dass die hier gegebenen Gegensatzpaare den Personen vertrauter waren und eine für sie klarer definierte Größe darstellten, zumal es sich bei den Teilnehmern um keine Experten im Bereich der Akustik oder Audiotechnik handelte.
Für alle abhängigen Variablen wurden nun zweifaktorielle Varianzanalysen mit Messwiederholung durchgeführt (*RM ANOVA - Repeatead Measurement Analysis of Variance*). Da nicht alle Variablen unter jeder Faktorstufe des Faktors Modalität zu bewerten waren, wird die weitere Analyse zunächst nach den auditiven, visuellen und audiovisuellen Attributen unterteilt. Für die auditiven Attribute sind hier also die rein akustischen und optoakustischen Stimuli ausgewertet, für die visuellen Attribute die rein optischen und optoakustischen Stimuli und für die audiovisuellen Attribute alle Stimuli des Kopräsenz-Paradigmas. Für die zwei ersteren Fälle bleiben somit für den Faktor Modalität nur noch zwei Faktorstufen übrig.
Für die Varianzanalyse stellt in der Berechnung jede einzelne perzeptiv bewertete Skala eine abhängige Variable dar, auch die Messwiederholung unter den verschiedenen Bedingungen. Im hier vorliegenden Fall ist also der erfasste Wert für jedes einzelne Attribut bei jedem einzelnen Stimulus – also unter jeder einzelnen Bedingung (im Kopräsenz-Paradigma jede Modalität und jeder Lautsprecher und im Konfliktreiz-Paradigma jeder optische und jeder akustische Lautsprecher) – eine abhängige Variable.
In Anhang A sind die Ergebnisse aller Varianzanalysen aufgeführt. Neben den üblichen Werten (*QS - Quadratsumme*, *df - Freiheitsgrad*, *MQ - Mittel der Quadrate*, *F-Wert*, *p-Wert*) wurden zur besseren Vergleichbarkeit der Effekte auch mit anderen Studien die Effektgrößen η^2 und η_p^2 und η_g^2 berechnet ([32]), sowie die Teststärke unter Verwendung von $\alpha = 0,05$. In der Auswertung wird dieses Versuches wird η^2 als ein Vergleichsparameter der einzelnen Effekte herangezogen werden. Es gibt die durch einen Effekt aufgeklärte Varianz im Verhältnis zur gesamten beobachteten Varianz an und kann somit durch Multiplikation mit hundert auch also Prozentwert angegeben werden. Wurde eine Verletzung der Sphärizitäts-Annahme gefunden, wurden die Freiheitsgrade nach Greenhouse-Geisser angepasst.
Im Kopräsenz-Paradigma ist die Modalität ein fester Faktor, da alle für die Untersuchung interessanten Ausprägungen oder Faktorstufen erfasst werden. Der Faktor Lautsprecher ist ein zufälliger. Es müsste aufgrund des einen festen Faktors ein Quadratsummentyp (Prüfvarianz) II verwendet werden ([33, S. 302-303]). Da die Verwendung vom Quadratsummentyp III jedoch nicht zu progessiveren Entschei-

dungen führen kann, wird, um Einfachheit und Einheitlichkeit zu wahren, auch im Kopräsenz-Paradigma dieser Typ III verwendet.
In Fällen, wo dies von Interesse ist, wurden zudem einzelne Paarvergleiche (ohne Anpassung) zwischen einzelnen Faktorstufen durchgeführt.

4.1.1 Auditive Attribute

Die meisten der auditiven Attribute weisen erwartungsgemäß signifikante Ergebnisse bei Variation des Faktors Lautsprecher auf. Dies ist ein nicht verwunderliches Ergebnis, denn die Wiedergabe von akustischen Signalen und das Erzeugen von guten auditiven Eindrücken ist die Hauptaufgabe eines Lautsprechers.

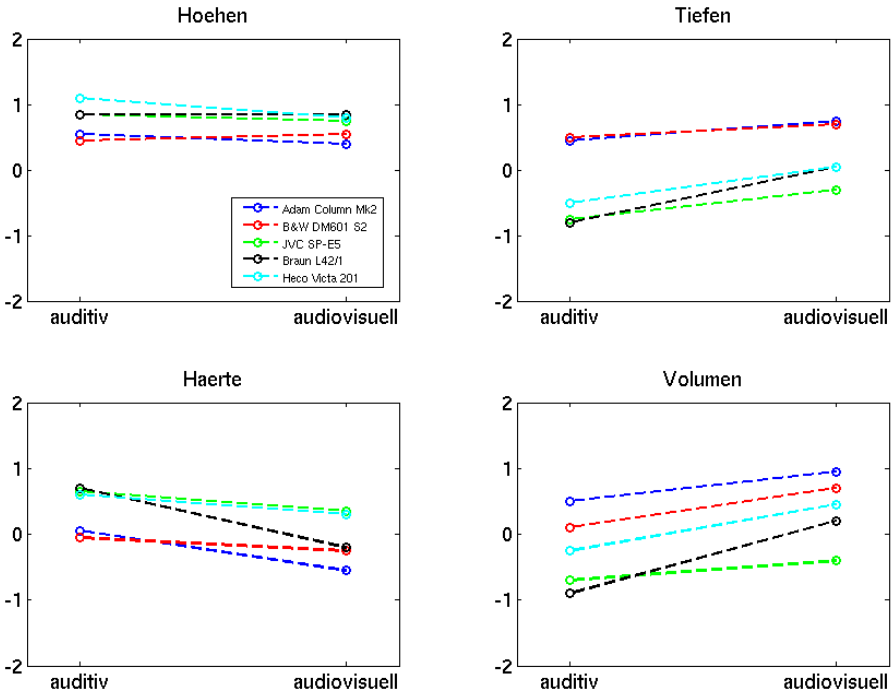


Abbildung 4.3: Mittelwerte der auditiven Attribute *Höhen*, *Tiefen*, *Härte* und *Volumen* abgetragen über die Modalität; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Die Variation des Faktors Lautsprecher bewirkt jedoch keinen signifikanten Unterschied in der Bewertung der Höhen. Dies ist auch in Abbildung 4.3 gut zu erkennen. In dieser Abbildung sowie in den folgenden Mittelwert-Darstellungen ist die Abzisse nominalskaliert und auf ihr wird jeweils ein Faktor aufgetragen. Dies bedeutet, dass zwischen den auf der x-Achse markierten Punkten natürlich keine

Werte gemessen wurden. Es wurde hier dennoch eine Verbindungslinie zwischen den eingetragenen Werten gezeichnet, um die Grafiken leichter lesbar zu gestalten. Die Werte für die Höhen liegen alle dicht beieinander. Die Versuchspersonen haben also kaum Unterschiede in der Höhenwiedergabe notiert. Das Attribut Höhen ist – neben der Lautheit – damit das einzige auditive, welches im Kopräsenz-Paradigma keine signifikanten Beobachtungen aufweist. Dies gilt auch für den Faktor Modalität. Obgleich die Lautsprecher auch in den Höhen Unterschiede zeigen, sind diese eventuell für die Teilnehmer nicht so einfach herauszuhören gewesen. Für den Faktor Lautsprecher ist das Ergebnis allerdings nur knapp nicht signifikant ($p = 0,080$). Die Teststärke ist zudem mit $0,539$ nicht besonders hoch. Es könnte daher sein, dass der zu erwartende Einfluss der Lautsprecher hier nicht gefunden wurde.
Der Anteil der perzeptiven Tiefen weist hochsignifikante Ergebnisse für den Faktor Lautsprecher ($p < 0,001$) auf. Schaut man auf Abbildung 4.3 erkennt man, dass vor allem beim *Adam*- und beim *B&W*-Lautsprecher mehr Tiefen gehört wurden. Ein Einzelvergleich der einzelnen Modelle bestätigt diesen Eindruck. Die beiden genannten Lautsprecher unterscheiden sich nicht signifikant, der Unterschied zu den anderen drei ist jedoch hochsignifikant ($p < 0,001$). Da diese beiden Modelle auch in der Messung die erkennbar beste Tiefenwiedergabe hatten, ist dies ein leicht erklärbarer Effekt. Auch die Modalität hat jedoch signifikanten Einfluss auf die Wahrnehmung der Tiefen ($p < 0,005$). Während das Lautsprechermodell in diesem Fall mit $\eta^2 = 0,194$ insgesamt $19,4\%$ der Varianz aufklären kann, sind dies bei der Modalität allerdings nur $4,5\%$. Letzteres ist ein kleiner Effekt nach Cohen [34]. Unter der audiovisuellen Bedingung wurden immer mehr Tiefen gehört. Auffällig ist, dass der Unterschied von der auditiven zur audiovisuellen Modalität bei den beiden Lautsprechern, die in den Tiefen sowieso gut bewertet sind, weniger ausgeprägt ist (Abb. 4.5). Bei *JVC*, *Heco* und besonders *Braun* ist hingegen ein deutlicherer Unterschied erkennbar. Ein signifikanter Interaktionseffekt ist hier aber nicht vorhanden.

Auch für das Attribut Härte finden sich hochsignifikante Ergebnisse für beide Faktoren ($p < 0,005$ für Lautsprecher und $p < 0,001$ für die Modalität). Der Effekt der Modalität ist mit $\eta^2 = 0,05$ auch hier klein. Der *Adam* und der *B&W* sind hier weicher bewertet worden. Gabrielsson et al. konnten für den Zusammenhang dieses perzeptiven Merkmals mit akustischen Eigenschaften von Lautsprechern herausarbeiten, dass weicher klingende Lautsprecher vor allem eine stärkere Tiefenwiedergabe aufweisen und das Verhältnis von Tiefen zu hohen Frequenzen von Bedeutung ist [35]. Dies erklärt, warum hier erneut *Adam* und *B&W* eng

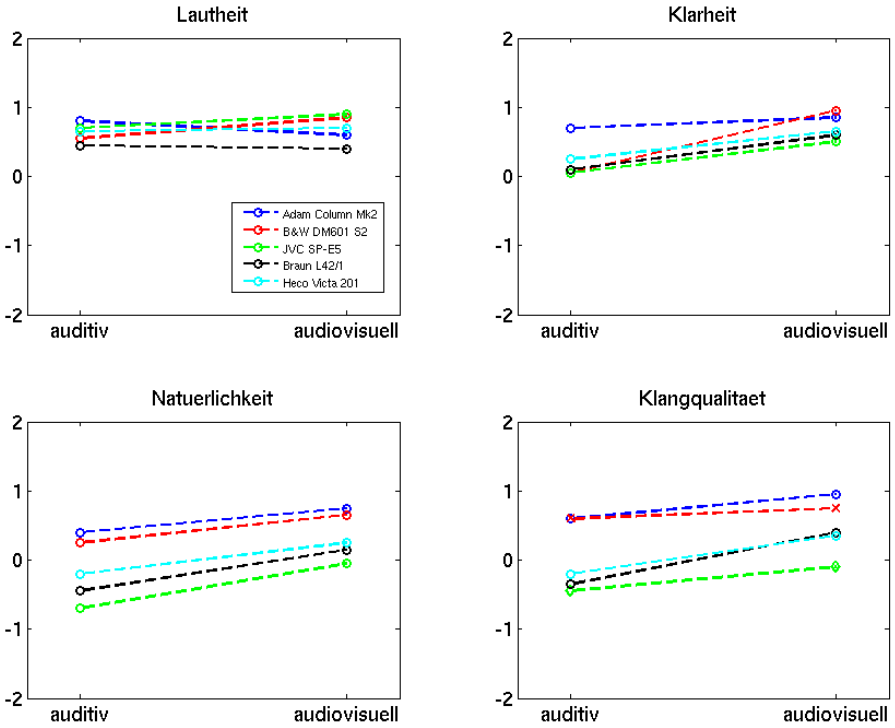


Abbildung 4.4: Mittelwerte der auditiven Attribute *Lautheit*, *Klarheit*, *Natürlichkeit* und *Klangqualität* abgetragen über die Modalität; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

beieinander liegen und als am wenigsten hart bewertet wurden. Zudem wurden alle Lautsprecher unter der audiovisuellen Bedingung weicher bewertet (4.5). Der größte Unterschied ist hier für das *Braun*-Modell zu sehen.
Die Bewertungen für das Volumen des Klanges sind ebenso hochsignifikant unterschiedlich bei Variation beider Faktoren ($p < 0,001$ für Lautsprecher und $p < 0,001$ für die Modalität). Der Faktor Lautsprecher weist allerdings die wesentlich größere Effektstärke auf. $19,3\%$ der Varianz können mit ihm erklärt werden. Erneut bilden *Adam* und *B&W* das eine Ende der der abgegebenen Bewertungen. Sie wurden am voluminösesten bewertet. Gabrielsson et al. beschreiben voluminös klingende Lautsprecher als solche mit einem breiten Übertragungsbereich [27]. Ein Blick auf die Frequenzgänge kann auch diese Ergebnisse bestätigen. Die beiden am besten bewerteten Modelle weisen die beste Tiefenwiedergabe auf und fallen zu hohen Frequenzen hin erst spät deutlich ab. Den größten Unterschied in der Modalität zeigt der *Braun*-Lautsprecher, wie auch bei der Härte. Insgesamt wurde allen Lautsprechern bei audiovisueller Wahrnehmung mehr Volumen zugesprochen

(Abb. 4.5). Auch dieser Effekt ist jedoch klein nach Cohen ($\eta^2 = 0,087$).

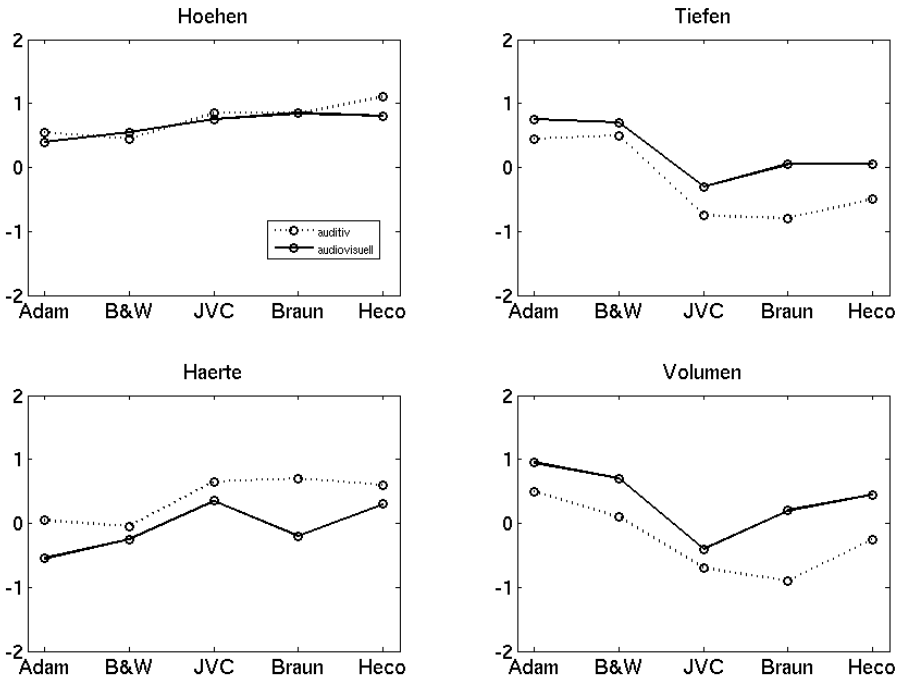


Abbildung 4.5: Mittelwerte der auditiven Attribute *Höhen*, *Tiefen*, *Härte* und *Volumen* abgetragen über den Lautsprechermodellen; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen zwei Lautsprechern dar

Für das Attribut Lautheit wurde kein Einfluss gefunden, weder des Lautsprechers noch der Modalität. Dies ist nicht verwunderlich, da die Stimuli wie in 3.9.2 beschrieben vor der Wiedergabe normalisiert wurden. Auch im Einzelvergleich der Lautsprecher wies hier keiner einen signifikanten Unterschied zu einem anderen auf. Zwar ist wahrgenommene Lautheit keineswegs nur vom Schallpegel bestimmt, und auch bei Lautsprechern (bzw. Radios) konnte Menzel kleine visuelle Effekte in Bezug auf die Lautheit finden [19], in diesem Fall scheinen aber weder ein Klangfarbenunterschied noch das Hinzukommen von visuellen Reizen eine gegenüber der auditiven Bedingung veränderte Lautheits-Wahrnehmung zu verursachen.
Die Klarheit wird erneut von beiden getesteten Faktoren signifikant beeinflusst. Für den Lautsprecher ist das Ergebnis allerdings mit $p = 0,038$ nicht so hochsignifikant, wie bei vielen anderen Attributen. Friedman-Tests des Faktors Lautsprecher für die dieses Attribute fallen für beide Modalitäten nicht signifikant aus ($p < 0,15$ und $p < 0,25$). Dieser Effekt muss daher in Frage gestellt werden. Für die Modalität hingegen. ergibt sich auch hier ein hochsignifikanter Effekt, der mit $7,1\%$

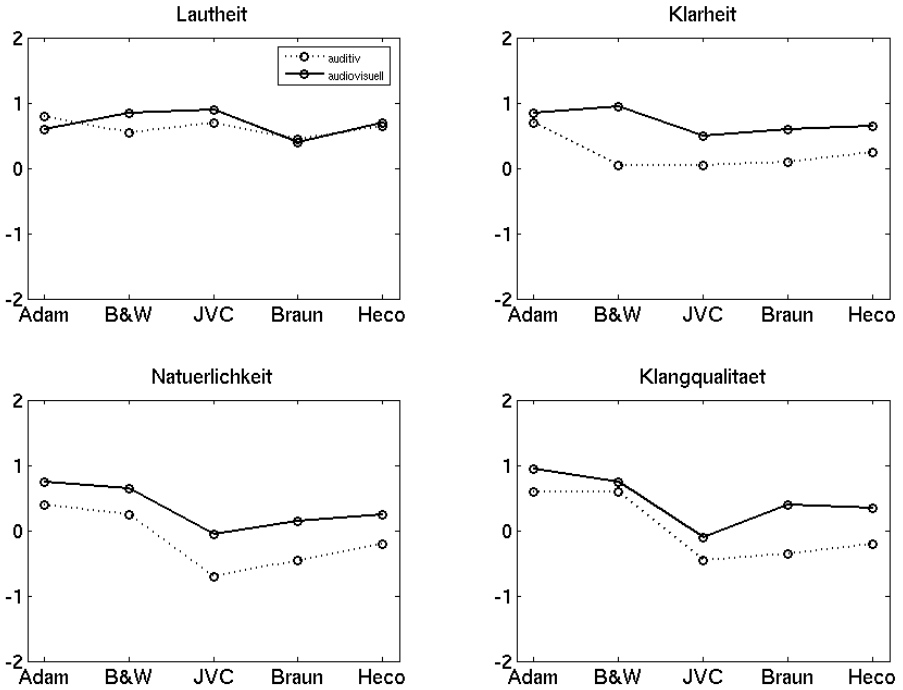


Abbildung 4.6: Mittelwerte der auditiven Attribute *Lautheit*, *Klarheit*, *Natürlichkeit* und *Klangqualität* abgetragen über den Lautsprechermodellen; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen zwei Lautsprechern dar

Varianzaufklärung erneut als klein einzustufen ist. Insgesamt schnitt der *Adam*-Lautsprecher am besten ab. Gabrielsson et al. erklären Klarheit vor allem mit einem ebenen Frequenzgang [35], den dieses Modell im Vergleich zu den anderen aufweist. Jeder Lautsprecher wurde audiovisuell als klarer bewertet als beim reinen Hören. Für den *Adam* macht die Modalität allerdings fast keinen Unterschied. Die größte Differenz findet sich für das Modell von *B&W* (Abb. 4.6).
Weiterhin ist auch der Einfluss sowohl des Lautsprechermodells als auch der Modalität auf die perzeptive Natürlichkeit der Wiedergabe hochsignifikant ($p < 0,001$ für Lautsprecher und $p < 0,001$ für die Modalität). Der durch die Modalität kommende Effekt weist hier $6,6\%$ Varianzaufklärung auf. Auch hier schneiden die Modelle *Adam* und *B&W* am besten ab (Abb. 4.4). Gabrielsson et al. nennen auch für die Natürlichkeit einen wichtigen Einfluss der Tiefenanteile im Frequenzgang eines Lautsprechers [35]. Alle Modelle wurden bei audiovisueller Bedingung in ähnlicher Weise besser bewertet als rein auditiv (Abb. 4.6).
Ebenso wird die Klangqualität hochsignifikant von den Faktoren Lautsprecher

($p < 0,001$) und Modalität ($p < 0,001$) beeinflusst. Die Effektstärke ist mit $\eta^2 = 0,173$ für den Faktor Lautsprecher deutlich größer (Modalität $\eta^2 = 0,049$). Wenig überraschend wurden hier – besonders unter der rein auditiven Bedingung – erneut die Modelle *Adam* und *B&W* am besten bewertet. Der Unterschied wird aber bei audiovisueller Wahrnehmung geringer im Vergleich zum *Braun* und zum *Heco* (Abb. 4.4). Ein signifkanter Interaktionseffekt ist allerdings nicht vorhanden. Audiovisuell wurde die Klangqualität stets besser beurteilt (Abb. 4.6).
Betrachtet man die perzeptiven Merkmale Tiefen, Natürlichkeit und Klangqualität in den Abbildungen 4.3 und 4.4, so sieht man, dass die Graphen für alle Lautsprecher hier sehr ähnlich verlaufen und angeordnet sind. Im Einzelvergleich für diese Attribute unterscheiden sich die Modelle von *Adam* und *B&W* jeweils nicht untereinander, aber signifikant von den anderen. Wie beschrieben, ist bei all diesen Attributen der Anteil der tiefen Frequenzen im Frequenzgang von großer Bedeutung. Denkt man sich die Polarisation der Skalen für das Attribute Härte in Abbildung 4.4 umgedreht, können auch hier Ähnlichkeiten erahnt werden. Ob auch eine statistisch signifkante Korrelation dieser Variablen vorliegt, wird in 4.3 untersucht.
Bei keinem auditiven Attribut konnten signifikante Interaktionseffekte zwischen Lautsprecher und Modalität gefunden werden.

4.1.2 Visuelle Attribute

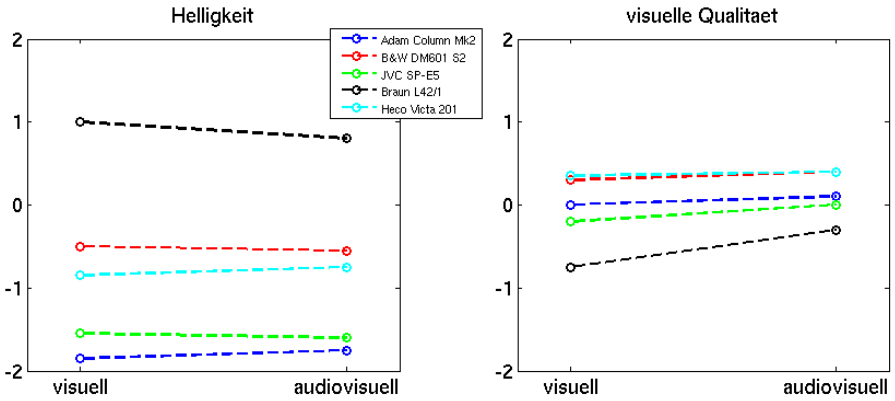


Abbildung 4.7: Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über der Modalität; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Das visuelle Attribut Helligkeit ist hochsignifikant beeinflusst durch das Lautsprechermodell ($p < 0,001$). Die Modalität trägt hier nicht zur Bewertung bei.

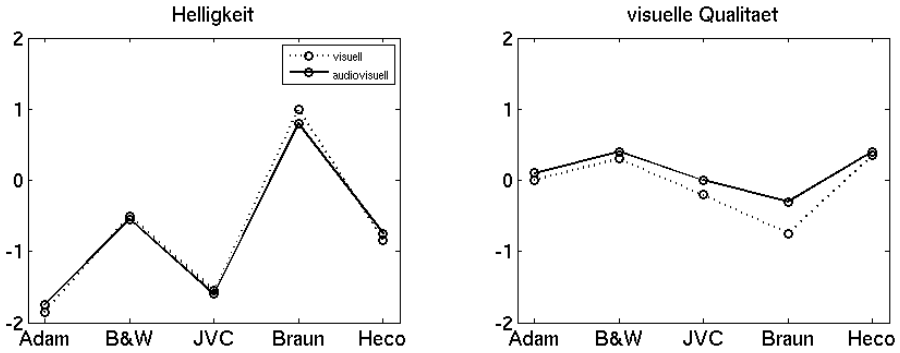


Abbildung 4.8: Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den Lautsprechermodellen; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen zwei Lautsprechern dar

Anscheinend ließen sich die Versuchspersonen hier also nicht vom Hinzukommen des Klanges beeinträchtigen und bewerteten die Helligkeit nur nach dem visuellen Eindruck. Somit sind hier nur die Lautsprecher relevant und es ergibt sich für diesen Faktor eine hohe Varianzaufklärung von $59,1\%$. Der *Braun*-Lautsprecher wurde hier deutlich am hellsten bewerten, er war auch der einzige mit weißem Gehäuse. Als am dunkelsten empfanden die Teilnehmer die Modelle *Adam* und *JVC* (Abb. 4.8). Mit der gelben Membran beim *B&W* und den silbernen Beschlägen beim *Heco* liegen diese beiden dazwischen.
Nicht so eindeutig gestalten sich die Bewertungen des Aussehens oder der visuellen Qualität. Der Lautsprecher weist auch hier einen signifikanten Wert auf ($p < 0,05$). Auch Friedman-Tests konnten diese Signifikanz bestätigen. Der Wert für die Modalität ist knapp nicht signifikant, bei schwacher Teststärke von $0,462$. *B&W*, *Heco* und *Adam* erhielten die höchsten Bewertungen, was passend ist zu der Einstufung in optische Qualität in 3.3 (Abb. 4.7).

4.1.3 Audiovisuelle Attribute

Auf das audiovisuelle Attribut Größe wirkt erneut der Lautsprecher einen hochsignifikanten Effekt aus ($p < 0,001$). Dieser Effekt ist groß und hat einen Anteil von $45,5\%$ an der gesamten Varianz. Auch hier ist der Wert für die Modalität mit $p = 0,059$ schwach nicht signifikant und es gibt eine Teststärke von $0,505$. Es findet sich hier jedoch ein hochsignifikanter Interaktionseffekt ($p < 0,001$). In den Abbildungen 4.9 und 4.10 lässt sich erkennen, dass die Größe bei rein akustischen Stimuli stets sehr ähnlich und nahe der Skalenmitte bewertet wurde, wie bereits in den Polaritätsprofilen gesehen. Konnten die Versuchspersonen die Lautsprecher

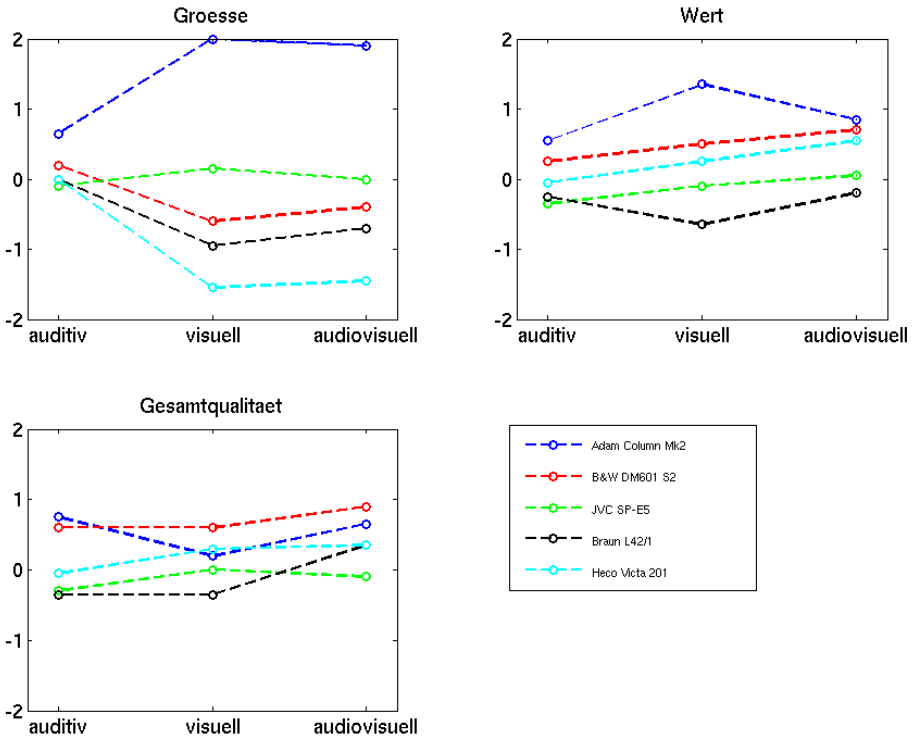


Abbildung 4.9: Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über der Modalität; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

dann auch sehen, gingen die Bewertungen viel weiter auseinander, natürlich in Abhängigkeit des Lautsprechers. Die Unterschiede zwischen der visuellen und audiovisuellen Bedingung sind hier sehr gering. Das Sehen scheint bei der Bewertung der Größe also dominant zu sein, bzw. bei reinem Hören fiel es den Teilnehmern eventuell schwer, ein Urteil über die Größe zu treffen.

Beide Faktoren haben signifikanten Einfluss auf den perzeptiven Wert. Der Lautsprecher scheint hier der wichtigere Faktor zu sein ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,198$). Die Modalität ist schwach signifikant. Im Friedman-Test ergiebt sich vor allem für den *Adam*-Lautsprecher mit $p = 0,01$ ein signifikanter Wert, wie es auch in Abbildung 4.9 zu erahnen ist. Ein Blick auf die Grafik zeigt auch, dass erneut *Adam* und *B&W* am besten bewertet wurden und dass die Bewertungen beim reinen Sehen der Lautsprecher die größten Differenzen aufweisen. Rein auditiv und audiovisuell rücken die Ergebnisse näher zusammen.
Die Gesamtqualität schließlich wird auch von beiden Faktoren beeinflusst ($p < 0,001$ für Lautsprecher und $p < 0,05$ für die Modalität), allerdings schwach von

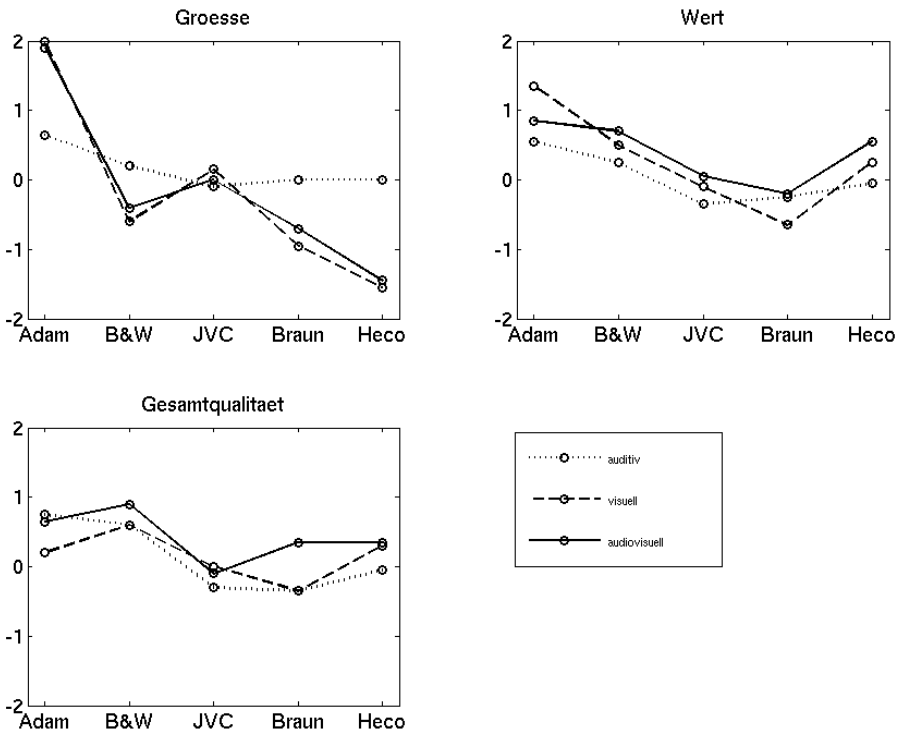


Abbildung 4.10: Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den Lautsprechermodellen; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen zwei Lautsprechern dar

der Modalität. Die Unterschiede zwischen den Modalitäten konnte ein Friedman-Test für das *Braun*-Modell als signifikant einstufen ($p = 0,01$). Der Faktor Lautsprecher kann hier $12,2\%$ der Varianz aufklären. Auch hier erhielten *Adam* und *B&W* hohe Bewertungen. Insgesamt wurde unter audiovisueller Bedingung etwas höher bewertet. Interaktionseffekte konnten für den Wert und die Gesamtqualität nicht gefunden werden.

4.2 Konfliktreiz-Paradigma

Das Konfliktreiz-Paradigma enthält alle optoakustischen Stimuli des Versuches, also alle 25 Kombinationen aus optischem und akustischem Lautsprecher. Jedes perzeptive Merkmal wurde hier also unter 25 unterschiedlichen Bedingungen bewertet. Wie im Kopräsenz-Paradigma wurden hier erst einmal die errechneten Mittelwerte der einzelnen Variablen angeschaut und anschließend Varianzanalysen für jedes Attribut durchgeführt. In diesem Fall verfügen nun die beiden Faktoren

optischer Lautsprecher und *akustischer Lautsprecher* in der Analyse jeweils über fünf Faktorstufen, nämlich eben die fünf verwendeten Lautsprechermodelle.

4.2.1 Auditive Attribute

Wie bereits im Kopräsenz-Paradigma zu erkennen gewesen ist, bewirkt ein Verändern des akustischen Lautsprechers kaum eine Änderung in der Bewertung der Höhen. Dies gilt auch für das Variieren des optischen Lautsprechers. Beide Faktoren haben keinen signifkanten Einfluss auf die Bewertungen der Versuchspersonen, alle Lautsprecher wurden hier als sehr ähnlich empfunden. Man erkennt dies gut in Abbildung 4.11. Die Graphen verlaufen hier sehr flach, fast eben. Der Interaktionseffekt beider Faktoren verfehlt hier nur knapp das angesetzte Signifikanzniveau von 5% ($p = 0,07$), allerdings auch bei einer Teststärke von $0,735$.

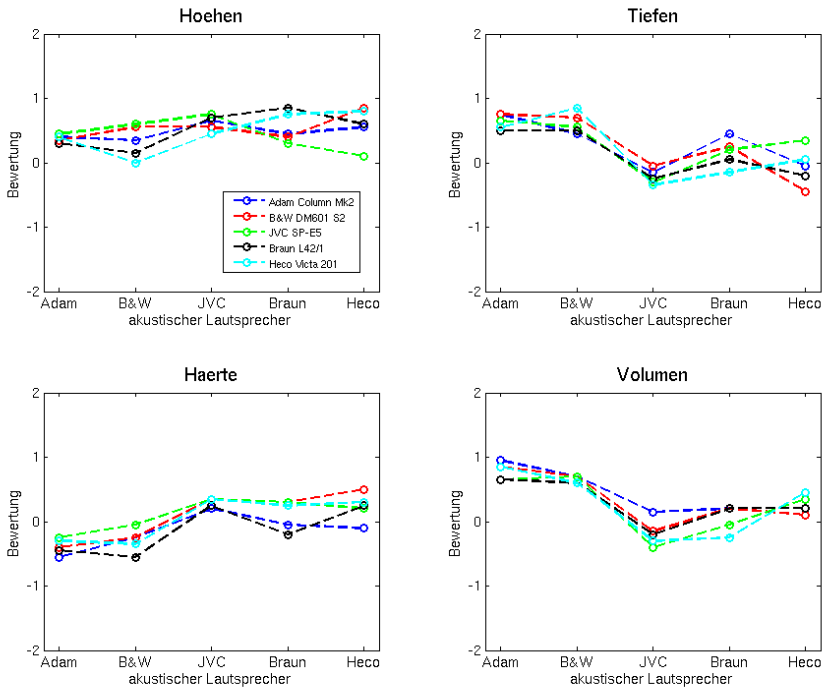


Abbildung 4.11: Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Die Bewertungen des Tiefenanteils gehen im Konfliktreiz-Paradigma hochsignifkant auf einen Einfluss des akustischen Lautsprechers zurück ($p < 0,001$), wobei der Effekt mit $\eta^2 = 0,124$ mittelgroß ist. Der optische Lautsprecher hat keinen Einfluss und es besteht auch kein Interaktionseffekt. Die Kurven in Ab-

bildung 4.11 verlaufen nahezu parallel und liegen auch sehr nah beieinander. Die Modelle *Adam* und *B&W* als akustische Lautsprecher erzielen hier erwartungsgemäß erneut die höchsten Werte, auch der *Braun* schneidet etwas besser ab. Dieses Ergebnis ist interessant, bedenkt man, dass die Tiefen im Kopräsenz-Paradigma einem signifikanten Einfluss der Modalität unterlagen. Es ist für dieses Merkmal anscheinend wichtig, ob man zum auditiven Reiz auch einen Lautsprecher sieht, es ist aber – zumindest im Rahmen der verwendeten Lautsprecher – nicht wichtig, welches Modell dies ist.

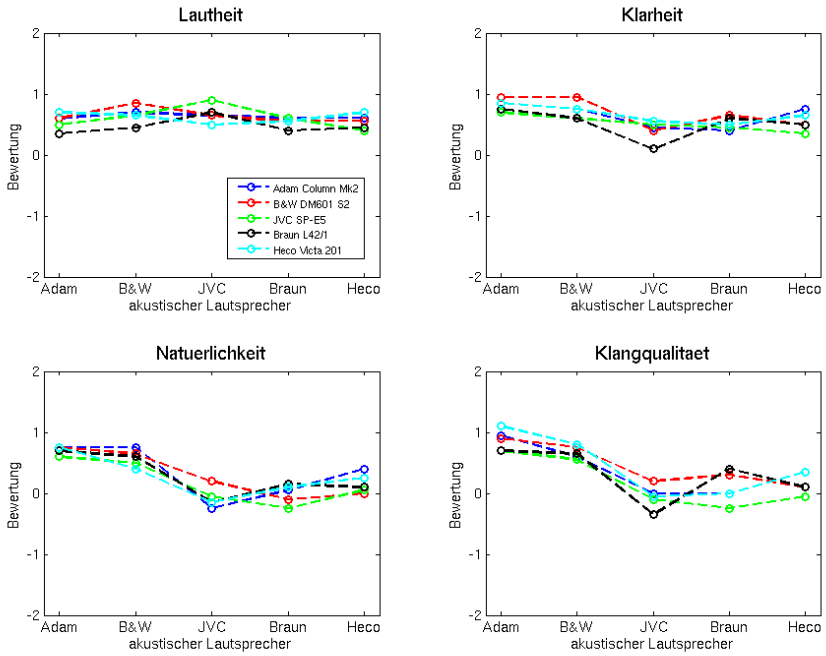


Abbildung 4.12: Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Auf die perzeptive Härte hat ebenfalls der akustische Lautsprecher hochsignifikanten Einfluss ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,096$). Der optische Lautsprecher erzielt einen p-Wert von $0,058$, also knapp über dem Signifikanzniveau. Die Teststärke beträgt $(0,664)$. Auch im Paarvergleich kann hier kein Unterschied zwischen einzelnen optischen Modellen gefunden werden.

Das auditive Volumen wird sehr eindeutig nur vom akustischen Lautsprecher bestimmt. Dieser Effekt ist mit ($p < 0001$) hochsignifikant und mittelgroß ($\eta^2 = 0,136$). Auch im Vergleich der Abbildungen 4.5 und 4.11 erkennt man die Ähnlichkeit der Kurven, in denen *Adam* und *B&W* (akustisch) erneut die höchsten

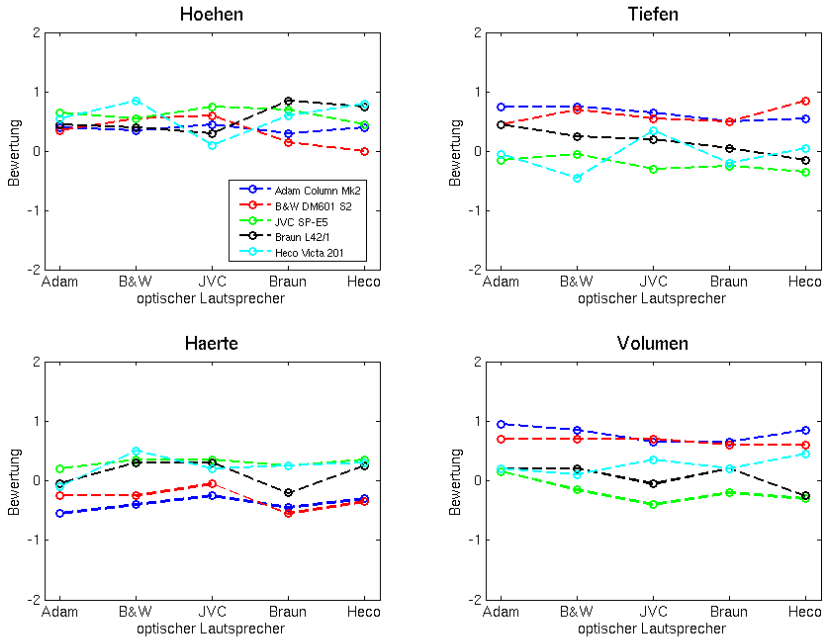


Abbildung 4.13: Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Werte erhielten, während *JVC* perzeptiv das kleinste Volumen hat. Ähnlich wie bei den Tiefen ist es auffällig, dass die Modalität im Kopräsenz-Paradigma noch wichtigen Einfluss auf die Bewertungen dieses Attributes hatte, die Wahl eines anderen optischen Lautsprechers hingegen nicht.
Auch bei der Lautheit bestätigt sich das im Kopräsenz-Paradigma genannte Ergebnis, dass die Empfindungen von keiner Variation der Bedingungen beeinträchtigt wurden. Wie bereits gesagt, ist dies sicherlich auf die vor dem Versuch angepasste Lautheit der Stimuli zurückzuführen. Auch das Verändern von optischen Stimuli macht das Lautheitsempfinden nicht größer oder kleiner.
Die Klarheit ist beeinflusst vom akustischen Lautsprecher ($p < 0,05$), der optische hat keinen nachgewiesenen Einfluss, obgleich der p-Wert mit $0,071$ hier erneut nur schwach über der Signifikanzgrenze liegt. Auch für die Klarheit gilt, dass der Faktor Modalität wichtig war, der optische Lautsprecher aber wohl weniger. In diesem Fall ist diese Aussage allerdings etwas unsicherer, da bei dem recht niedrigen p-Wert nur eine Teststärke von $0,633$ erreicht wurde.
Die Natürlichkeit hingegen ist klar durch den akustischen Lautsprecher bestimmt ($p < 0,001$), gut erkennbar in den nah zusammen verlaufenden Graphen in Abbildung 4.12. Mit $12,1\%$ Varianzaufklärung ist der Effekt mittelgroß. Im Kopräsenz-

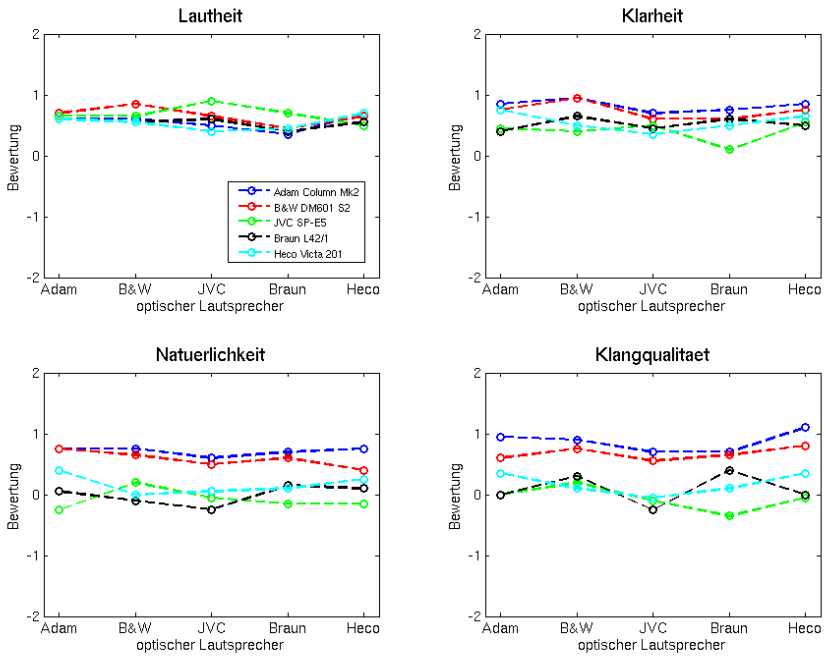


Abbildung 4.14: Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Paradigma wurde für dieses perzeptive Merkmal auch noch ein hochsignifikanter Effekt durch die Modalität festgestellt. Wie bereits bei einigen vorigen Attributen bemerkt, ist also auch hier das Sehen eines Lautsprechers von positiver Wirkung für das Bewertung, die Art des optischen Lautsprechers war im Versuch jedoch nicht wichtig dafür.

Ähnlich verhält es sich für die Klangqualität. Der Einfluss des akustischen Lautsprechers ist – wenig verwunderlich – hochsignifikant ($p < 0,001$), der des optischen jedoch nicht. $13,7\%$ Varianzaufklärung zeigen erneut eine mittlere Effektgröße an. Auch für die Klangqualität gab es jedoch im Kopräsenz-Paradigma einen hochsignifikanten Einflusses der Modalität mit positivem Einfluss unter der audiosvisuellen Bedingung gegenüber der rein auditiven.

Die Beobachtung, dass die Variation des optischen Lautsprechers auf die Bewertungen der auditiven Attribute zumeist klar keinen Einfluss hat, ist gut ablesbar in den Abbildungen 4.13 und 4.14. Fast alle Graphen verlaufen hier sehr flach.

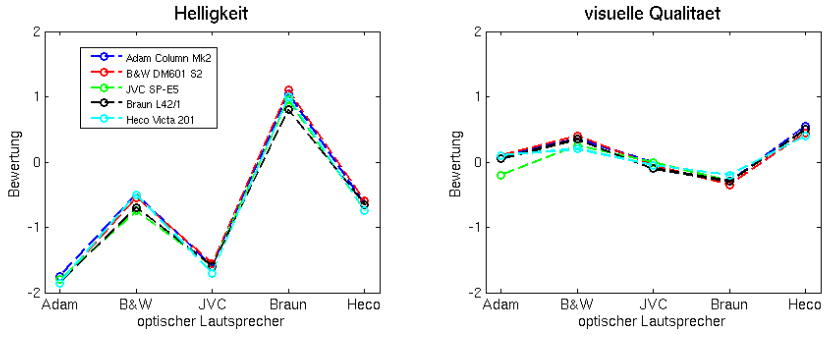


Abbildung 4.15: Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

4.2.2 Visuelle Attribute

Die perzeptive Helligkeit ist, wie auch schon im Kopräsenz-Paradigma zu erkennen gewesen ist, klar vom Faktor optischer Lautsprecher bestimmt und nicht von der Akustik. Der Effekt ist hier hochsignifikant ($p < 0,001$). Der sehr hohe Wert für η^2 ist auffällig. $61,6\%$ der Varianz gehen auf den optischen Lautsprecher zurück. Der *Braun*-Lautsprecher mit dem weißen Gehäuse wurde klar als am hellsten bewertet. *Adam* und *JVC* am dunkelsten (Abb. 4.15 und 4.16). Mit der gelben Membran beim *B&W* und den silbernen Beschlägen beim *Heco* liegen diese beiden dazwischen.

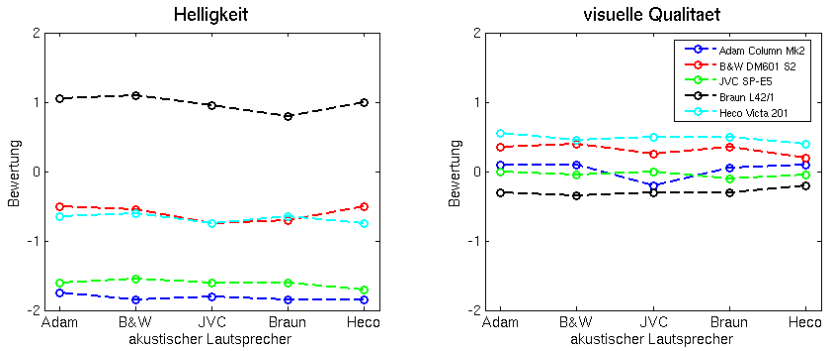


Abbildung 4.16: Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Der akustische Lautsprecher wirkt nicht auf die visuelle Qualität. Die Variation des optischen ist nur schwach nicht signifikant ($p = 0,68$), was erstaunlich ist. In Paarvergleichen und Friedman-Tests konnten allerdings einzelne Abhängigkeiten vom optischen Modell gefunden werden. So wurden die akustischen *Adam*, *B&W*

und *Braun* bei Wechsel des optischen Lautsprechers signifikant anders bewertet (jeweils $p < 0,05$). Insgesamt scheinen die optischen Lautsprechermodelle hier entscheidend zu sein, sie liegen aber in der Bewertung alle nah beieinander.

4.2.3 Audiovisuelle Attribute

Bei den multimodalen Merkmalen wird die perzeptive Größe lediglich hochsignifikant von der Wahl des optischen Lautsprechers bestimmt ($p < 0,001$), wobei $70,9\%$ der Varianz hiermit erklärt werden können. Der akustische Lautsprecher hat keinen signifikanten Einfluss, gut zu erkennen in Abbildung 4.17 und 4.18. Der *Adam*-Lautsprecher, welcher als einziger Standlautsprecher deutlich größere Abmessungen als alle anderen aufwies, wird hier auch klar als am größten bewertet, *Heco* als klar am kleinsten. Dieses Modell wies auch die kleinste Fläche in der Frontansicht auf.

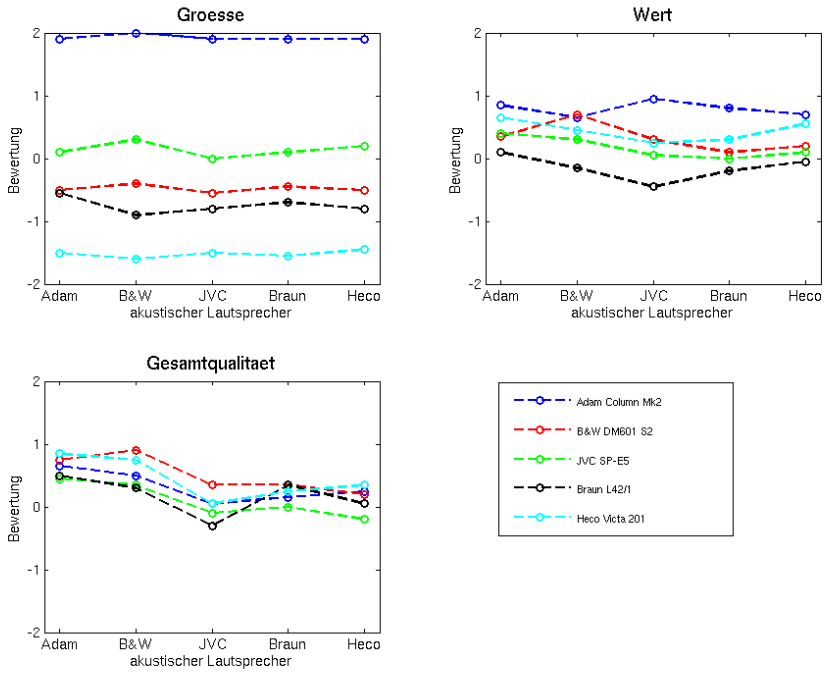


Abbildung 4.17: Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

Interessant ist die Auswertung der Analyse für das perzeptive Attribut Wert. Sowohl der akustische als auch der optische Lautsprecher üben hier signifikan-

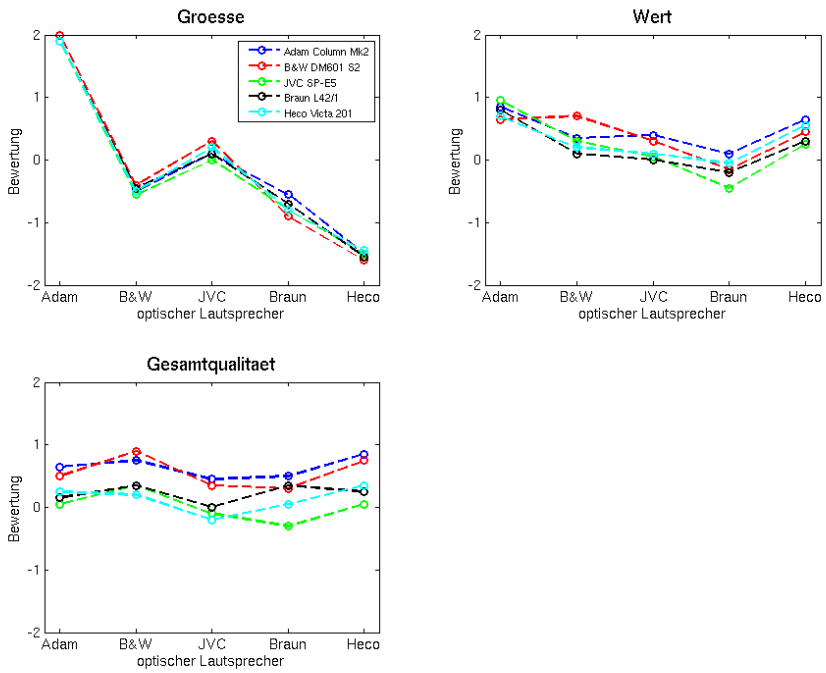


Abbildung 4.18: Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern; die einzelnen Werte sind zur besseren Lesbarkeit mit Linien verbunden, die Linien stellen keine Werte zwischen den Modalitäten dar

te Effekte aus ($p < 0.05$ und $p < 0,001$). Der Effekt für den Faktor optischer Lautsprecher weist hier nicht nur den niedrigeren p-Wert auf, sondern auch die mit $\eta^2 = 0,111$ ($11,1\%$ Varianzaufklärung) größere Effektstärke. Die akustische Komponente trägt nur $1,2\%$ bei, also ein sehr kleiner Effekt, während die Effektgröße des optischen Lautsprechers nach Cohen fast als mittelgroß einzustufen ist. Bei der Schätzung des Wertes eines Lautsprechers haben die Versuchspersonen also den visuellen Reizen die höhere Bedeutung zugemessen. Dies verstärkt die im Kopräsenz-Paradigma gewonnene Erkenntnis, dass sich der perzeptive Wert vor allem unter der visuellen Bedingung verändert (vgl. Abb. 4.9). Die auditiven Eindrücke sind in diesem Fall jedoch auch wichtig. Unter dem optischen Lautsprecher *Adam* oder *Heco* und teilweise *B&W* wurden hier die höchsten Bewertungen erreicht.

Die empfundene Gesamtqualität hingegen ist wieder von der Akustik der Lautsprecher bestimmt ($p < 0,001$). Mit einem p-Wert von $0,113$ ist der Einfluss des optischen Lautsprechers hier nicht signifikant. Ähnlich wie bei vielen der auditiven Merkmale ist die Modalität im Kopräsenz-Paradigma für die Bewertungen der Gesamtqualität wichtig gewesen. Vor allem unter audiovisueller Bedingung wurden

höhere Werte erzielt. Die Art des gesehenen Lautsprechers hat im Versuch jedoch keinen signifikanten Effekt auf die Bewertung mehr ausgeübt. Auffällig ist, dass der Wert vom optischen Lautsprecher abhängt, die Gesamtqualität nicht. Offensichtlich sind diese zwei Variablen für die Versuchspersonen sehr unterschiedliche Dinge.

4.3 Zusammenhänge von Variablen

Der vorige Abschnitt untersuchte die Einflüsse der unabhängigen Variablen, also der Faktoren optischer bzw. akustischer Lautsprecher, auf die abhängigen Variablen, die perzeptiven Attribute. In einigen Fällen lassen sich auch Zusammenhänge zwischen verschiedenen abhängigen Variablen vermuten. Betrachten wir beispielsweise die beiden auditiven Attribute Natürlichkeit und Klangqualität in Abbildung 4.12, so ist auffällig, dass für beide perzeptiven Merkmale die Kurven einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Es kann daher vermutet werden, dass eine Korrelation zwischen diesen zwei Variablen besteht. In diesem Abschnitt sollen verschiedene Variablen auf derartige Beziehungen hin untersucht werden. Hierfür wurden Korrelationsanalysen zwischen einzelnen Variablen durchgeführt. Weiterhin kann bei korrelierten Attributen eine Regressionsanalyse vorgenommen werden, um die Art des Zusammenhanges zu bestimmen.

4.3.1 Kopräsenz-Paradigma

Die Analysen ergaben im Bereich der auditiven Attribute hohe Korrelationen vieler Merkmale. Die Klangqualität korreliert signifikant zu allen anderen abgefragten auditiven Merkmalen außer der Lautheit, was sicherlich auf die normalisierten Stimuli zurückzuführen ist. Dieses Ergebnis ist erwartungsgemäß, denn die Attribute wurden nach der Maßgabe ausgesucht, die Qualität von Klang beschreiben zu können. Die Korrelation der Klangqualität zu den Höhen und der Härte ist negativer Art, zu den restlichen auditiven Attributen ist sie positiv. Im Falle der Höhen ist der Zusammenhang allerdings deutlich weniger signifikant ($p < 0,05$). Alle anderen genannten Attribute weisen hochsignifikante Korrelationen auf. Auch der Korrelationskoeffizient r (*Pearson*) ist bei den Höhen mit $-0,166$ im Betrag deutlich geringer als die anderen. Der Koeffizient r ist ein Maß für die Enge eines linearen Zusammenhangs [33, S. 204-207]. Er nimmt Werte an zwischen -1 (perfekt negativer linearer Zusammenhang) und 1 (perfekt positiver linearer Zusammenhang). $r = 0$ steht für keinen Zusammenhang. Alle anderen genannten Attribute weisen hochsignifikante Korrelationen auf.

Das die Zusammenhänge tatsächlich linearer Natur sind, lässt sich durch Anfertigen von Streudiagrammen, in denen erste Vermutungen über die Art der Korrelation getroffen werden können, erkennen. Da die verwendete fünfstufigen Skalen in Streudiagrammen kein anschauliches Bild liefern, wurden die Mittelwerte verwendet. Anhand der Diagramme konnte schnell ein jeweils linearer Zusammenhang vermutet werden (z.B. Abb. 4.19).

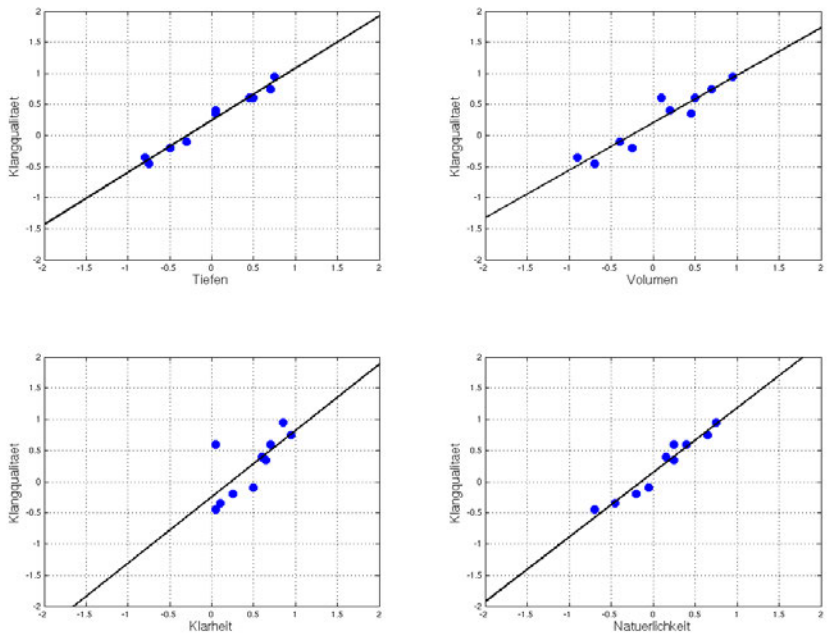


Abbildung 4.19: Regressionsgerade und Mittelwerte des auditiven Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit von *Tiefen*, *Volumen*, *Klarheit* und *Natürlichkeit*

Durch Berechnen einer Regressionsanalyse kann dieser Zusammenhang quantifiziert werden. Hierfür wurden ebenfalls die Mittelwerte der abhängigen Variablen verwendet. Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen finden sich in Anhang B. Hierbei ist durch das korrigierte R^2, das korrigierte Bestimmtheitsmaß (oder der Determinationskoeffizient) gegeben. Durch dieses wird der Anteil der Varianz beziffert, der durch den gefundenen Zusammenhang erklärt werden kann [33, S. 209-210]. Der p-Wert in der Tabelle der Regressionskoeffizienten gibt die Signifikanz der gefundenen Geraden, also der Koeffizienten an. Die Spalte B enthält die Regressionskoeffizienten.

Der bereits mit dem Auge vermutete Zusammenhang zwischen der Klangqualität und der Natürlichkeit ist hochsignifikant ($p < 0,001$). Das korrigierte $R^2 = 0,932$ zeigt die hohe Korrelation. Auch die gefundenen Regressionskoeffizienten $0,146$

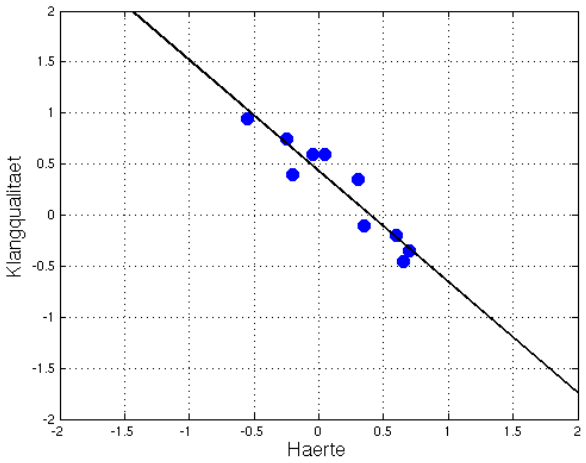


Abbildung 4.20: Regressionsgerade und Mittelwerte des auditiven Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit von der *Härte*

und $1,037$ sind signifikant mit $p < 0,001$. In diesem Fall ist der Zusammenhang also durch die Regressionsgerade

$$y(x) = 1,037x + 0,146$$

beschrieben.

Abbildung 4.19 zeigt unten rechts ein Streudiagramm der Mittelwert der genannten Variable, sowie die Regressionsgerade. Ebenso sind Diagramme für die Klangqualität über den auditiven Merkmalen Tiefen, Volumen und Klarheit abgebildet. Der lineare Zusammenhang ist sehr klar erkennbar. Für die Attribute Tiefen (korrigiertes $R^2 = 0,973$) und Volumen (korrigiertes $R^2 = 0,886$) ergeben sich ebenfalls sehr hohe Bestimmtheitsmaße. Bei der Klarheit fällt dieser Wert geringer aus (korrigiertes $R^2 = 0,466$), was vor allem an einem Mittelwert oberhalb der Geraden liegt. Dieser wurde für die Berechnungen nicht entfernt.
Ähnlich verhält es sich für den Zusammenhang zwischen der Klangqualität und dem Attribut Härte. Der Zusammenhang ist hier allerdings negativ – je härter der Klang, desto geringer die Qualität (Abb. 4.20). Auch hier ist mit dem korrigierten $R^2 = 0,873$, also $87,3\%$ ein großer Teil der Varianz aufgeklärt.
Hohe Korrelation lassen sich auch finden für die Gesamtqualität in Abhängigkeit vieler auditiver Attribute. Abschnitt 4.1 deutete bereits an, dass die akustischen Merkmale der Lautsprecher die dominierenden sind, wenn es um die Bewertung der Qualität geht. So lassen sich hier auch sehr ähnliche Beziehungen zwischen der Gesamtqualität und den mit der Klangqualität korrelierten Attributen finden.

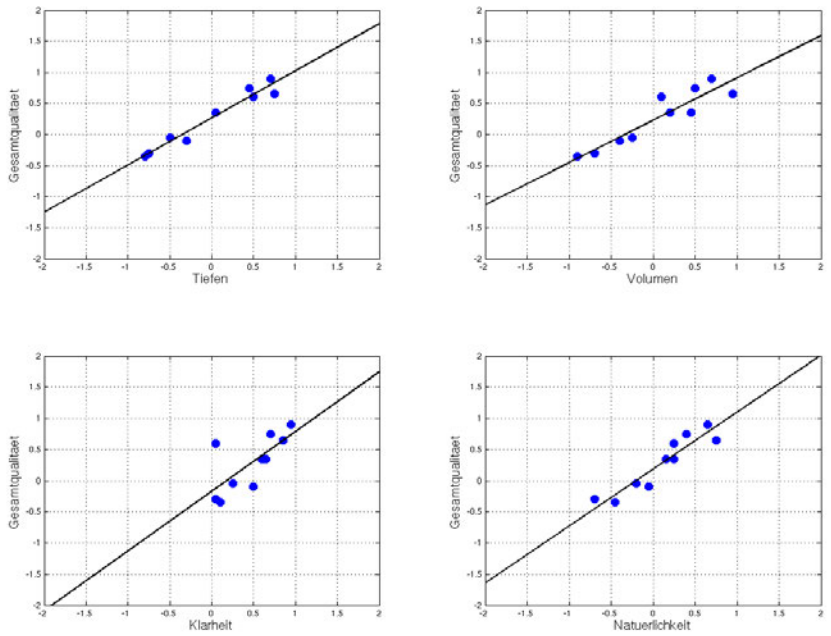


Abbildung 4.21: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit von *Tiefen*, *Volumen*, *Klarheit* und *Natürlichkeit*

All dies legt nahe, dass auch die Gesamtqualität zum Attribut Klangqualität korreliert ist. Die Analyse zeigt, dass dies der Fall ist ($(p < 0,001,\ r = 0,817)$). Abbildung 4.22 zeigt die Streuung der Mittelwerte und die berechnete Regressionsgerade. Es ergibt sich hier erneut ein hoher Wert für das korrigierte $R^2 = 0,912$. Die Gesamtqualität steigt ebenfalls linear mit der Klangqualität.
Für die gesamte Qualität konnte jedoch auch ein Zusammenhang mit der visuellen Qualität gefunden werden (Abb. 4.22). Auch die Regressionsanalyse über die Mittelwerte ergibt einen signifikantes Ergebnis ($p < 0,05$). Das Bestimmtheitsmaß fällt allerdings deutlich kleiner aus (korrigiertes $R^2 = 0,493$). Der Zusammenhang ist nicht so stark, wie der zwischen Gesamt- und Klangqualität. Das Visuelle hängt aber mit der gesamten Beurteilung zusammen.

Auch der Wert und die gesamte Qualität korrelieren hochsignifikant ($p < 0,001$, Abb. 4.22), was interessant ist, bedenkt man, dass kein direkter Einfluss des optischen Lautsprechers auf die Gesamtqualität gefunden werden konnte. Der Wert hingegen wird auch durch den visuellen Reiz bestimmt. Auch für Wert und Gesamtqualität ergibt sich allerdings mit einem korrigierten $R^2 = 0,440$ ein niedrigerer Wert. Die Steigung der Regressionsgeraden ist hier mit $1,247$ größer als bei den anderen bislang gefundenen Zusammenhängen.

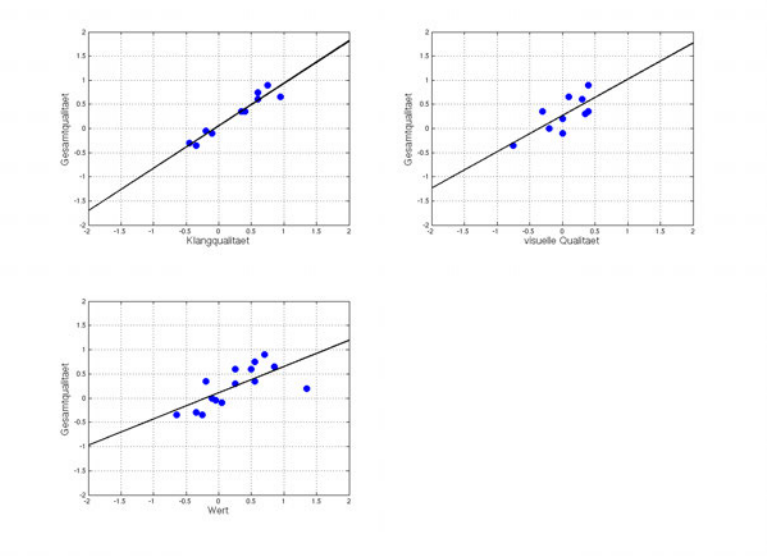


Abbildung 4.22: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit der Klangqualität, der visuellen Qualität und des *Wertes*

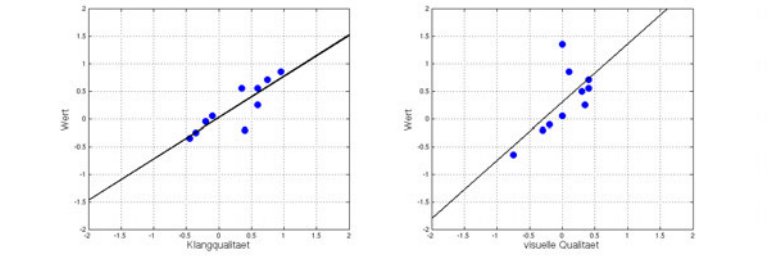


Abbildung 4.23: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Wert* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität*

Abbildung 4.23 schließlich zeigt die Mittelwertstreuung und die Regressionsgerade für den Wert in Abhängigkeit der Klangqualität und der visuellen Qualität. Der Wert scheint mit der visuellen Qualität sogar stärker zu steigen, als mit der Klangqualität. Bei einem Blick auf die Grafik, sieht man allerdings sofort, dass dieses Phänomen vor allem durch einen Wert weit über der Geraden verursacht ist. Die hierdurch aufgeklärte Varianz ist bei der Klangqualität mit $70,1\%$ deutlich höher als für die visuelle Qualität ($37,9\%$).

4.3.2 Konfliktreiz-Paradigma

Im Konfliktreiz-Paradigma finden sich sehr ähnliche Zusammenhänge zwischen den perzeptiven Attributen wie bereits im Kopräsenz-Paradigma. Die Klangqualität ist auch hier hochkorreliert zu auditiven Attributen, besonders zu den Tiefen, dem Volumen, der Klarheit und der Natürlichkeit (Abb. 4.24). Ebenso ist der negative lineare Zusammenhang zur Härte festzustellen. Auffällig ist die sehr starke Steigung der Klangqualität in Abhängigkeit der Klarheit $(1,784)$.
Das höchste Bestimmtheitsmaß erreicht hier die Natürlichkeit (korrigiertes $R^2 = 0,835$). Die Natürlichkeit ist neben den Tiefen auch im Kopräsenz-Paradigma das Attribut mit dem festesten Zusammenhang zur Klangqualität. Es scheint ein für die Bewertung des Klanges also sehr wichtiges perzeptives Merkmal zu sein. Die Tiefen weisen im Konfliktreiz-Paradigma nur noch ein korrigiertes $R^2 = 0,497$ auf.

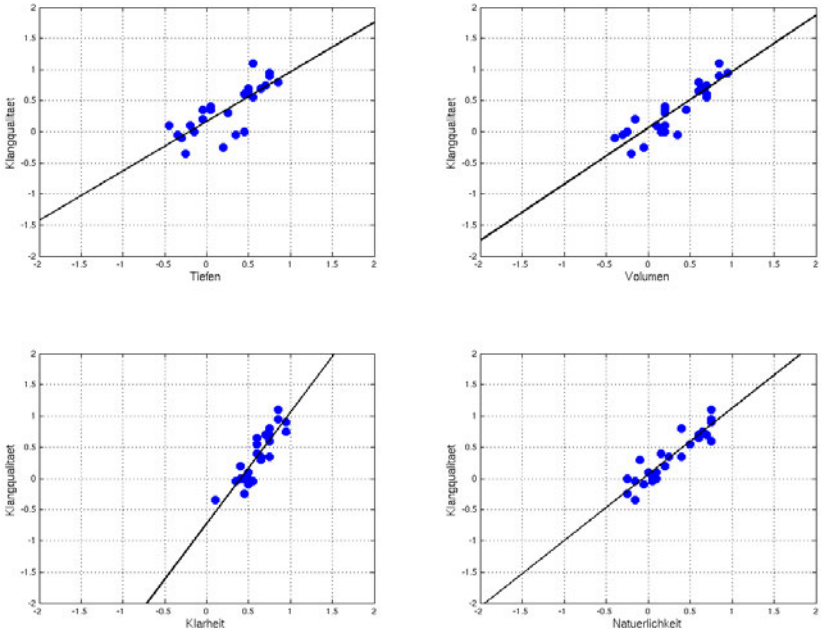


Abbildung 4.24: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit der *Tiefen*, des *Volumens*, der *Klarheit* und der *Natürlichkeit*

Die Gesamtqualität ist auch im Konfliktreiz-Paradigma korreliert zur Klangqualität (korrigiertes $R^2 = 0,840$). Der Zusammenhang zur visuellen Qualität lässt sich ebenfalls auch hier wiederfinden, jedoch wie auch im Kopräsenz-Paradigma auch hier mit deutlich schwächerem Bestimmtheitsmaß (korrigiertes $R^2 = 0,205$), gut zu erkennen an den mehr verteilten Punkten in Abbildung 4.25. Auch ist die

Regressionsgerade mit $p = 0,013$ nur noch signikant auf dem 5%-Niveau.

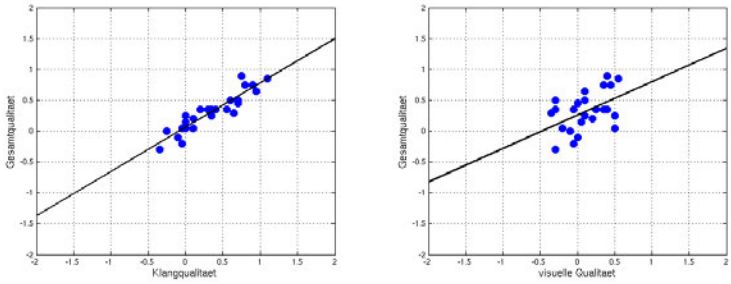


Abbildung 4.25: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität*

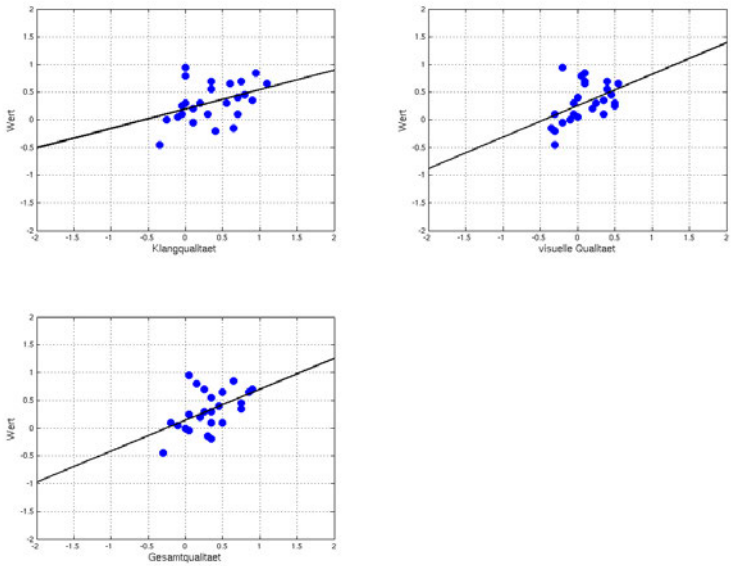


Abbildung 4.26: Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Wert* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität* und der *Gesamtqualität*

Der Wert weist eine Korrelation zur Klangqualität, der visuellen Qualität und der Gesamtqualität auf. Diese Beziehungen sind jedoch schwächer als noch im Kopräsenz-Paradigma. Die errechneten Regressionskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen Wert und Klangqualität weisen hier nur ein $p = 0,048$ auf. Das korrigierte $R^2 = 0,122$ ist hier ausgesprochen gering. Auch die Werte für die Gesamtqualität und die visuelle Qualität sind hier kleiner (korrigiertes $R^2 = 0,208$ und $R^2 = 0,172$). Die nur schwach signifikante Abhängigkeit ist in Abbildung 4.26

gut zu erkennen. Die einzelnen Punkte des Streudiagramms bilden hier keine klare Gerade mehr.

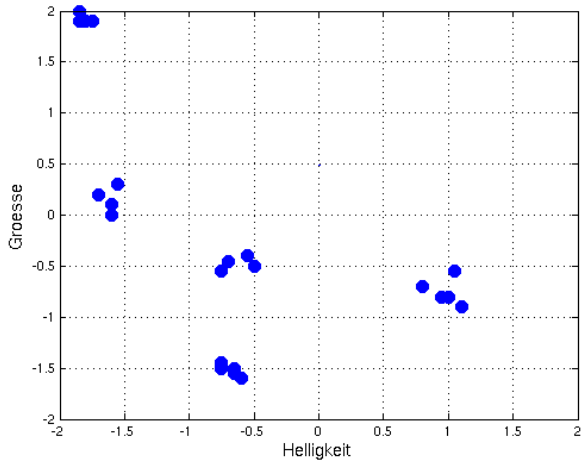


Abbildung 4.27: Attribut *Größe* in Abhängigkeit der *Helligkeit*

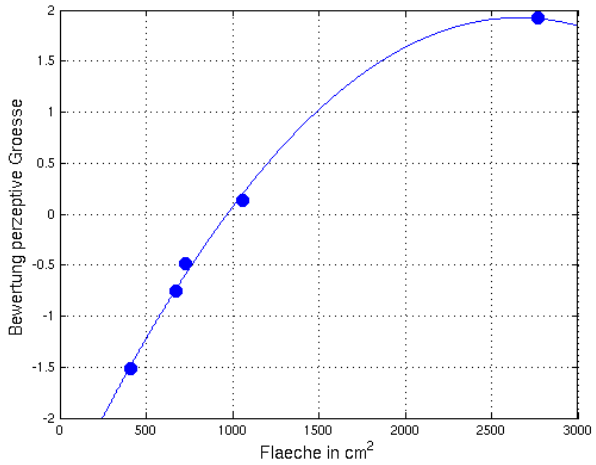


Abbildung 4.28: Attribut *Größe* in Abhängigkeit der Frontfläche der optischen Lautsprecher; von links nach rechts sind dies *Heco*, *Braun*, *B&W*, *JVC* und *Adam*

Trägt man die perzeptive Größe in Abhängigkeit der Helligkeit in ein Streudiagramm, zeigt sich der eindeutige Einfluss des optischen Lautsprechers, während der akustische keine Unterschiede verursacht. Die Mittelwerte sind hier im Diagramm (Abb. 4.27) je optischem Lautsprecher gruppiert. Es lässt sich in diesem Fall aber kein sinnvoll bezifferbarer Zusammenhang zwischen den Variablen benennen. Anhand der perzeptiven Größe lässt sich gut der sehr dominante Einfluss

der visuellen Modalität erkennen, wenn man jeweils die fünf Bewertungen eines optischen Lautsprechers unter der Bedingungen der fünf akustischen mittelt und über der Fläche der Frontseite des optischen Modells abträgt, zeigt sich der Zusammenhang, welcher hier quadratisch ist. Die Koeffizienten für diese Kurve sind mit $-6,74 * 10^{-7} * x^2 + 0,036x - 2,84$ gegeben. Es ergibt sich in diesem Fall ein korrigiertes $R^2 = 0,994$.

Tabelle 4.2: Faktorenanalyse rotierte Komponentenmatrix

	Komponente			
	1	2	3	4
Höhen	-0,11	0,04	-0,16	0,81
Tiefen	0,76	0,07	0,00	-0,26
Härte	-0,65	0,06	-0,09	0,17
Volumen	0,82	0,07	-0,02	0,10
Lautheit	-0,04	0,12	0,05	0,08
Klarheit	0,29	0,05	0,25	0,40
Natürlichkeit	0,65	-0,04	0,29	0,20
Klangqualität	0,69	-0,05	0,46	0,15
Helligkeit	0,10	-1,08	-0,22	-0,16
visuelle Qualität	0,03	-0,01	0,97	-0,08
Größe	0,26	1,14	-0,42	-0,24
Wert	0,17	0,31	0,41	-0,04
Gesamtqualität	0,51	-0,02	0,59	0,16

Durch eine Faktorenanaylse kann versucht werden, die Korrelationen der einzelnen abhängigen Variablen auf wenige Einflussfaktoren zurückzuführen. In diesem Fall bestätigen sich die Ergebnisse der oben gemachten Einzelvergleiche von Variablen und die gezeigten Zusammenhänge lassen sich auch in der Komponentenmatrix (Kovarianzmatrix) einer Faktorenanalyse erkennen. Man sieht hier vor allem, dass die Bewertungen der Tiefen, der Härte, des Volumens, der Natürlichkeit und der Klangqualität einem gemeinsamen Faktor (Faktor 1) entstammen, da sie dem Betrag nach ähnlich hohe Werte aufweisen. Ein höherer Wert zeigt eine Beeinflussung durch einen Faktor an. Wie bei den einzelnen Attributen erklärt, scheint der Tiefenanteil in der Übertragungsfunktion der Lautsprecher hier eine wichtige Rolle zu spielen. Die Zugehörigkeit der Gesamtqualität zu diesem Faktor

ist zu erahnen.
In Faktor 3 sieht man das Zusammenhängen der Gesamtqualität und der visuellen Qualität. Die Gesamtqualität folgt diesem Faktor aber auch hier nur leicht. Eine Benennung dieses Faktors ist daher nicht leicht möglich.

5 Zusammenfassung

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die audiovisuelle Wahrnehmnung von Lautsprechern zu untersuchen. Als letztes Glied in der Audioübertragungskette, ist der Lautsprecher die schließlich klangproduzierende Komponente. Dies macht ihn zu einem besonders für den Hörer sehr wichtigen Teil der Übertragung und viele haben in ihrem täglichen Leben verschiedenste Lautsprecher im Einsatz. Im Alltag eines Menschen werden jedoch Klänge häufig zusammen mit Reizen anderer Modalitäten wahrgenommen und in Bezug auf die audiovisuelle Wahrnehmung konnte bereits in vielen Forschungsarbeiten nachgewiesen werden, dass Sehen und Hören nicht nur einzelne Sinne oder voneinander separierte Modalitäten sind, sondern Teil eines komplexen Wahrnehmnungssystems, in dem sich die Sinneskanäle gegenseitig beeinflussen. Ebenso ist auch das Hören von Musik, Sprache oder anderen Audiosignalen über einen Lautsprecher im Grunde nie ein unimodaler Prozess. Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit war daher die Frage, ob auch die Wahrnehmnung von Lautsprechern und vor allem die Bewertung ihrer Qualität besonderen Einflüssen des Visuellen unterliegen, obgleich es doch der primäre Zweck eines Lautsprechers ist, Schall zu produzieren.

Um diese Frage zu untersuchen, wurde ein in zwei Paradigmen – das Kopräsenz- und das Konfliktreiz-Paradigma – unterteilter Hörversuch durchgeführt. Die Idee des ersten dieser zwei Paradigmen war es, die Wahrnehmnung eines Lautsprechers unter den drei Bedingungen *auditiv*, *visuell* und *audiovisuell* zu untersuchen. Es wurden also Versuchspersonen Lautsprecher vorgespielt, ohne dass sie gesehen werden konnten, gezeigt, ohne dass sie gehört werden konnten, und schließlich so präsentiert wie sie eben sind und wie Menschen sie wohl am häufigsten wahrnehmen: audiovisuell. Ziel dieses Paradigmas war es, herauszufinden, ob in diesem Fall grundsätzlich ein Einfluss der Modalitäten auf die Wahrnehmung und die Qualitätsbewertung besteht.

Im zweiten Paradigma wurden nur noch multimodale Reize produziert. Systematisch wurden hier Konfliktreize hergestellt, also solche, bei denen die Informationen zweier Sinneskanäle nicht zueinander passen. Eine Versuchsperson sollte also einen

Lautsprecher hören, aber einen anderen dazu sehen. Soll dieser Konflikt für den Hörer bzw. Seher möglichst glaubhaft sein, stellt einen dies vor die Aufgabe, zwei Lautsprecher an denselben Ort zu stellen, um keine Differenzen in der Lokalisation in Kauf nehmen zu müssen. Da dies physikalisch nicht möglich ist, wurde der akustische Teil der hier benötigten Stimuli mit Hilfe von dynamischer Binauralsynthese simuliert, was es möglich machte, einen virtuellen akustischen Lautsprecher und einen realen optischen an exakt der gleichen Stelle im Raum zu platzieren. Durch das systematische Variieren der optischen und akustischen Komponente, kann versucht werden, sofern Unterschiede in der perzeptiven Bewertung auftreten, diese auf bestimmte Eigenschaften der Stimulikomponenten zurückzuführen.
Für den Hörversuch wurden fünf verschiedene Lautsprecher-Modelle ausgesucht, die markante Unterschiede in optischen und akustischen Eigenschaften aufweisen. Diese wurden zunächst für die Binauralsynthese vermessen, indem binaurale Raumimpulsantworten aufgenommen wurden.
Im Hörversuch wurden die Eindrücke der Versuchspersonen mit Hilfe eines semantischen Differentials erfasst. Hierbei sind perzeptive Merkmale der Lautsprecher abgefragt worden, die sich drei untersuchte Modalitäten (auditiv, visuell, audiovisuell) unterteilen lassen. Aus Gründen der Machbarkeit in Bezug auf die Stichprobengröße wurde ein Versuchsdesign mit kompletter Messwiederholung gewählt.
Die Auswertung des Versuches im Kopräsenz-Paradigma zeigte signifikante Einflüsse der Lautsprechermodelle und der Modalitäten auf die Bewertungen. Dass hier die verschiedenen Lautsprecher perzeptive Unterschiede verursachen, ist nicht verwunderlich. Es ist aber interessant, dass die Modalität wichtigen Einfluss auf die gesamte Beurteilung hat. Dies gilt insbesondere für die auditiven Attribute. Diese werden zumeist besser bewertet, wenn ein Lautsprecher nicht nur gehört, sondern audiovisuell wahrgenommen wird, also auch ein Lautsprecher dazu gesehen wird. Dies gilt für alle untersuchten auditiven Attribute mit Ausnahme der Höhen und der Lautheit. Bei der Lautheit ist dies vermutlich auf normalisierte Pegel zurückzuführen. Für die visuellen Attribute konnte im Versuch kein signifikanter Einfluss der Modalität festgestellt werden. Für die audiovisuellen Attribute Wert und Gesamtqualität konnte neben der des Lautsprechermodelles auch wieder eine Abhängigkeit der Modalität gefunden werden. Die perzeptive Größe ist das einzige Attribut, für welches ein Interaktionseffekt auftrat. Dies liegt offensichtlich daran, dass hier die visuelle Modalität Übergewicht hat, denn rein auditiv wurden alle Lautsprecher als sehr ähnlich groß eingeschätzt.
Im Konfliktreiz-Paradigma zeigte sich, dass für die auditiven Attribute vor allem der akustische Lautsprecher von Bedeutung ist. Wie schon im Kopräsenz-

Paradigma hatte das Modell jedoch auch hier keinen signifikanten Einfluss auf die Höhen- und Lautheits-Wahrnehmnung. Alle anderen auditiven Merkmale sind signifikant für die akustische Lautsprecherkomponente. Bei der perzeptiven Härte und Klarheit verfehlt die optische Komponente knapp die Signifikanz auf dem 5%-Niveau. Dieses Ergebnis ist besonders interessant, setzt man es in Verbindung mit dem des Kopräsenz-Paradigmas. Dort wurde gezeigt, dass die meisten auditiven Merkmale besser bewertet werden, wenn ein Lautsprecher nicht nur gehört sondern auch gesehen wird. Die Ergebnisse des Konfliktreiz-Paradigmas lassen jedoch vermuten, dass es dabei anscheinend eine untergeordnete Rolle spielt, was für einen Lautsprecher man sieht. Es ist jedoch auch denkbar, dass die im Versuch verwendeten Lautsprecher Modelle waren, die sich z.B. in ihrem optischen Eigenschaften nicht hinreichend unterschieden, und somit bezüglich der untersuchten Attribute keine Effekte gefunden werden konnten.
Untersuchte visuelle Attribute sind in keinster Weise vom akustischen Lautsprecherteil beeinflusst, ebenso die Größe. Die Gesamtqualität ist akustisch bestimmt, der Wert jedoch sowohl vom optischen als auch vom akustischen Lautsprecher. Hierbei hatten die optischen Lautsprecher mehr Einfluss auf den geschätzten Wert als die akustischen. Obgleich diese zwei Attribute korrelieren, scheinen für ihre Einzelbewertung verschiedene Aspekte wichtig. Die Effekte sind hier jedoch von kleiner Natur.
Auch wenn das Hauptaugenmerk nicht auf ihnen lag, konnten im Versuch von Gabrielsson et al. ([35], [28] herausgearbeitete perzeptive Merkmale zur Beschreibung von Klangqualität weitgehend bestätigt werden. Die Studien von Karandreas und Christensen konnten keinen Einfluss einer visuellen Komponente auf Lautsprecherqualität finden [20]. Dies konnte in der vorliegenden Arbeit geschafft werden, indem gezeigt wurde, dass viele perzeptive Urteile unter audiovisueller Bedingung besser ausfallen, als unter rein auditiver. Dieser Einfluss des Visuellen konnte jedoch nur teilweise quantifiziert werden, da bei Variation des gesehenen Lautsprechers kaum noch signifikante Einflüsse auf die wahrgenommenen Qualitätsmerkmale beobachtet werden konnten. Insgesamt haben die Versuchspersonen im Test optische und akustischen Komponenten der Lautsprecher durchaus zu trennen gewusst. Die Effekte der optischen Lautsprecherkomponenten auf die Qualitätsbewertung scheinen klein zu sein. Um sich Ihnen weiter zu nähern, könnten eventuell in Versuchen vor allem die optischen Merkmale noch markanter verändert werden, als es in diesem Versuch der Fall war, der zum primären Ziel hatte, herauszufinden, ob prinzipielle Einflüsse der unterschiedlichen Modalitäten und Komponenten auf das Qualitätsurteil vorhanden sind.

Literaturverzeichnis

[1] Ansorge, Ulrich und Helmut Leder (2011): „Multimodale Wahrnehmung." In: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit.* VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 135–139.

[2] Haus, Karl-Michael (2010): „Sensorische Systeme." In: *Neurophysiologische Behandlung bei Erwachsenen.* Springer Berlin Heidelberg, S. 13–26.

[3] Patsouras, Christine; Thomas Filippou und Hugo Fastl (2002): „Influences of color on the loudness judgement." In: *Proceedings of 3rd EEA European Congress on Acoustics Forum Acusticum.* Sevilla, Spain.

[4] Menzel, Daniel; Hugo Fastl; Ralf Graf und Jürgen Hellbrück (2008): „Influence of vehicle color on loudness judgments." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5) S. 2477–2479.

[5] Blauert, Jens (1974): *Räumliches Hören: Monographien der Nachrichtentechnik.* S. Hirzel Verlag.

[6] Pick, Herbert L.; David H. Warren und John C. Hay (1969): „Sensory conflict in judgments of spatial direction." In: *Perception & Psychophysics*, 6(4) S. 203–205.

[7] Howard, Ian P. und William B. Templeton (1966): *Human spatial orientation.* London u.a.: London u.a. : Wiley.

[8] Jackson, C. V. (1953): „Visual factors in auditory localization." In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 5(2) S. 52–65.

[9] Witkin, H. A.; S. Wapner und T. Leventhal (1952): „Sound localization with conflicting visual and auditory cues." In: *Journal of Experimental Psychology*, 43(1) S. 58–67.

[10] Gardner, Mark B. (1968): „Proximity Image Effect in Sound Localization." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 43(1) S. 163–163.

[11] Kohlrausch, Armin und Steven van de Par (2005): „Audio-Visual Interaction in the Context of Multi-Media Applications." In: Jens Blauert (Hrg.) *Communication Acoustics*. Springer Berlin Heidelberg, S. 109–138.

[12] McGurk, Harry und John MacDonald (1976): „Hearing lips and seeing voices." In: *Nature*, 264(5588) S. 746–748.

[13] Pollack, Irwin und J. M. Pickett (1957): „Cocktail Party Effect." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(11) S. 1262.

[14] Maempel, Hans-Joachim und Matthias Jentsch (2013): „Auditory and Visual Contribution to Egocentric Distance and Room Size Perception." In: *Building Acoustics*, 20(4) S. 383–402.

[15] Beerends, John G. und Frank E. De Caluwe (1999): „The Influence of Video Quality on Perceived Audio Quality and Vice Versa." In: *J. Audio Eng. Soc*, 47(5) S. 355–362.

[16] Rimell, Andrew N.; Michael P. Hollier und R. M. Voelcker (1998): „The Influence of Cross-Modal Interaction on Audio-Visual Speech Quality Perception." In: *Audio Engineering Society Convention 105*.

[17] Fastl, Hugo (2005): „Psycho-Acoustics and Sound Quality." In: Jens Blauert (Hrg.) *Communication Acoustics*. Springer Berlin Heidelberg, S. 139–162.

[18] Schucker, Kim Kristin (2009): *Einfluss der optischen Mikrofoneigenschaften auf die klangliche Beurteilung - Untersuchung am Beispiel Farbe*. Bachelorarbeit, Hochschule der Medien Stuttgart, Stuttgart.

[19] Menzel, Daniel (2009): „Can different colours influence most comfortable level of speech and music?" In: *3rd International VDT Symposium*. Hohenkammer.

[20] Karandreas, Alex und Flemming Christensen (2008): „Influence of Visual Appearance on Loudspeaker Sound Quality Evaluation." In: *124th Audio Engineering Society Convention*. Amsterdam, The Netherlands.

[21] Maempel, Hans-Joachim (2012): „Experiments on audio-visual room perception: A methodological discussion." In: *38. DAGA 2012*. Darmstadt, S. 783–784.

[22] Lindau, Alexander; Torben Hohn und Stefan Weinzierl (2007): „Binaural Resynthesis for Comparative Studies of Acoustical Environments." In: *122nd Audio Engineering Society Convention*. Vienna, Austria.

[23] Maempel, Hans-Joachim und Matthias Jentsch (2013): „Audio-visual interaction of size and distance perception in concert halls - a preliminary study." In: *International Symposium on Room Acoustics*. Toronto, Canada.

[24] Lindau, Alexander (2006): *Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden*. Magisterarbeit, Technische Universität, Fakultät 1, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft, Berlin.

[25] Osgood, C.E.; G.J. Suci und P.H. Tannenbaum (1957): *The Measurement of Meaning*. Illini books. University of Illinois Press.

[26] Wilkens, Henning (1978): „Vergleich der subjektiven Beurteilung von Lautsprechern aus Paarvergleichen und Einzelbeurteilungen." In: *11. Tonmeistertagung 1978*. S. 215–220.

[27] Gabrielsson, Alf und Håkan Sjögren (1979): „Perceived sound quality of sound-reproducing systems." In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4) S. 1019–1033.

[28] Gabrielsson, Alf und Björn Lindström (1985): „Perceived Sound Quality of High-Fidelity Loudspeakers." In: *J. Audio Eng. Soc*, 33(1/2) S. 33–53.

[29] Toole, Floyd E. (1982): „Listening Tests - Turning Opinion into Fact." In: *J. Audio Eng. Soc*, 30(6) S. 431–445.

[30] Schmider, Emanuel; Matthias Ziegler; Erik Danay; Luzi Beyer und Markus Bühner (2010): „Is it really robust? Reinvestigating the robustness of ANOVA against violations of the normal distribution assumption." In: *Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences*, 6(4) S. 147 – 151.

[31] Olsson, Ulf Henning; Tron Foss; Sigurd V. Troye und Roy D. Howell (2000): „The Performance of ML, GLS, and WLS Estimation in Structural Equation Modeling Under Conditions of Misspecification and Nonnormality." In: *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 7(4) S. 557–595. doi:10.1207/S15328007SEM0704_3.

[32] Bakeman, Roger (2005): „Recommended effect size statistics for repeated measures designs." In: *Behavior Research Methods*, 37(3) S. 379–384. doi: 10.3758/BF03192707.

[33] Bortz, Jürgen (2005): *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg: Springer.

[34] Cohen, J. (1988): *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* L. Erlbaum Associates.

[35] Gabrielsson, Alf; Björn Lindström und Ove Till, „Loudspeaker frequency response and perceived sound quality: Measurements in listening rooms."

Abbildungsverzeichnis

3.1 Im Hörversuch verwendete Lautsprecher 18
3.2 Präpariertier Drehteller, auf dem die Lautsprecher platziert wurden 19
3.3 Versuchsaufbau im Aufnahmeraum des SIM 20
3.4 Messroboter FABIAN auf dem Stuhl für die Versuchspersonen vor der Messung der BRIR 21
3.5 Übertragungsfunktion der jeweils linken Lautsprecher im Raum, linkes Ohr 22
3.6 Übertragungsfunktion der jeweils linken Lautsprecher im Raum, rechtes Ohr 23
3.7 Schematischer technischer Aufbau während des Hörversuches 30
3.8 Weg der Audiodaten in der akustischen Simulation 33
3.9 Interaurale Laufzeitdifferenz (in ms) bei der Messung des einen *Adam*-Lautsprechers für die verschiedenen Winkel (in Grad) 34
3.10 Altersstruktur der Versuchspersonen 36

4.1 Polaritätsprofil des *B&W DM601 S2* im Kopräsenz-Paradigma . . . 41
4.2 Polaritätsprofil für die Modalität *auditiv* im Kopräsenz-Paradigma . 42
4.3 Mittelwerte der auditiven Attribute *Höhen*, *Tiefen*, *Härte* und *Volumen* abgetragen über die Modalität, Kopräsenz-Paradigma 44
4.4 Mittelwerte der auditiven Attribute *Lautheit*, *Klarheit*, *Natürlichkeit* und *Klangqualität* abgetragen über die Modalität, Kopräsenz-Paradigma 46
4.5 Mittelwerte der auditiven Attribute *Höhen*, *Tiefen*, *Härte* und *Volumen* abgetragen über den Lautsprechermodellen, Kopräsenz-Paradigma 47
4.6 Mittelwerte der auditiven Attribute *Lautheit*, *Klarheit*, *Natürlichkeit* und *Klangqualität* abgetragen über den Lautsprechermodellen, Kopräsenz-Paradigma 48
4.7 Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über der Modalität, Kopräsenz-Paradigma 49

4.8 Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den Lautsprechermodellen, Kopräsenz-Paradigma 50
4.9 Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über der Modalität, Kopräsenz-Paradigma 51
4.10 Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den Lautsprechermodellen, Kopräsenz-Paradigma 52
4.11 Mittelwerte der auditiven Attribute *Höhen*, *Tiefen*, *Härte* und *Volumen* abgetragen über den akustischen Lautsprechern 53
4.12 Mittelwerte der auditiven Attribute *Lautheit*, *Klarheit*, *Natürlichkeit* und *Klangqualität* abgetragen über den akustischen Lautsprechern 54
4.13 Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern 55
4.14 Mittelwerte der auditiven Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern 56
4.15 Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern 57
4.16 Mittelwerte der visuellen Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern 57
4.17 Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den akustischen Lautsprechern 58
4.18 Mittelwerte der audiovisuellen Attribute abgetragen über den optischen Lautsprechern 59
4.19 Regressionsgerade und Mittelwerte des auditiven Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit von *Tiefen*, *Volumen*, *Klarheit* und *Natürlichkeit* 61
4.20 Regressionsgerade und Mittelwerte des auditiven Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit von der *Härte* 62
4.21 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit von *Tiefen*, *Volumen*, *Klarheit* und *Natürlichkeit* . . . 63
4.22 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit der Klangqualität, der visuellen Qualität und des *Wertes* 64
4.23 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Wert* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität* 64
4.24 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Klangqualität* in Abhängigkeit der *Tiefen*, des *Volumens*, der *Klarheit* und der *Natürlichkeit* 65

4.25 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Gesamtqualität* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität* 66
4.26 Regressionsgerade und Mittelwerte des Attributs *Wert* in Abhängigkeit der *Klangqualität* und der *visuellen Qualität* und der *Gesamtqualität* 66
4.27 Attribut *Größe* in Abhängigkeit der *Helligkeit* 67
4.28 Attribut *Größe* in Abhängigkeit der Frontfläche der optischen Lautsprecher 67

C.1 Polaritätsprofil des *Adam Column Mk3* im KopräsenzParadigma . . 93
C.2 Polaritätsprofil des *JVC SP-E5* im Kopräsenz-Paradigma 94
C.3 Polaritätsprofil des *Braun L420/1* im Kopräsenz-Paradigma 94
C.4 Polaritätsprofil des *Heco Victa 201* im Kopräsenz-Paradigma 95
C.5 Polaritätsprofil für die Modalität *visuell* Kopräsenz-Paradigma . . . 95
C.6 Polaritätsprofil für die Modalität *audiovisuell* im Kopräsenz-Paradigma 96

D.1 Fragebogen in *LimeSurvey*, Erklärung des Versuchs 97
D.2 Fragebogen in *LimeSurvey*, auditive, visuelle und audiovisuelle Attribute; auf Fragebögen für rein optische bzw. rein akustische Stimuli fehlten die auditiven bzw. die visuellen Bewertungen 98

Tabellenverzeichnis

3.1 Versuchsdesign und Stimuli für den Hörversuch 14
3.2 Auswahlkriterien und Lautsprecher für den Hörversuch 16
3.3 Attribute und Gegensatzpaare des Semantischen Differentials 26

4.1 Attribute und Gegensatzpaare des Semantischen Differentials gruppiert nach Modalität; die Spalte *Stimuli* gibt an, bei welchen Stimuli, die entsprechende Gruppe von Attributen abgefragt wurde, die Polarität der Skalen ist einheitlich, die Skalen werden also von links nach rechts immer größer oder positiver im Sinne des entsprechenden Attributes 40
4.2 Faktorenanalyse rotierte Komponentenmatrix 68

A.1 Attribut *Höhen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 82
A.2 Attribut *Tiefen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 82
A.3 Attribut *Härte*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 83
A.4 Attribut *Volumen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 83
A.5 Attribut *Lautheit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 83
A.6 Attribut *Klarheit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 83
A.7 Attribut *Natürlichkeit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma . . . 83
A.8 Attribut *Klangqualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma . . . 84
A.9 Attribut *Helligkeit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 84
A.10 Attribut *visuelle Qualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma . . 84
A.11 Attribut *Größe*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 84
A.12 Attribut *Wert*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma 84
A.13 Attribut *Gesamtqualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma . . 85
A.14 Attribut *Höhen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 85
A.15 Attribut *Tiefen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 85
A.16 Attribut *Härte*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 85
A.17 Attribut *Volumen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 86

A.18 Attribut *Lautheit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 86
A.19 Attribut *Klarheit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 86
A.20 Attribut *Natürlichkeit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma . . . 86
A.21 Attribut *Klangqualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma . . . 87
A.22 Attribut *Helligkeit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 87
A.23 Attribut *visuelle Qualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma . 87
A.24 Attribut *Größe*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 87
A.25 Attribut *Wert*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma 88
A.26 Attribut *Gesamtqualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma . . 88

A Varianzanalysen

Im Folgenden sind die Tabellen zu den durchgeführten Varianzanalysen im Kopräsenz-Paradigma aufgeführt. *QS* bezeichnet die Quadratsummen, *MQ* den Mittelwert der Quadrate. Die mit * markierten Freiheitsgrade wurden aufgrund von Verletzungen der Sphärizitätsannahme unter Verwendung des ε nach Greenhouse-Geisser korrigiert. Die Teststärke ist berechnet mit $\alpha = 0.05$.

A.1 Kopräsenz-Paradigma

Tabelle A.1: Attribut *Höhen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	7,380	2,552*	2,892	2,494	0,080	0,041	0,042	0,116	0,539
Fehler (Lautsprecher)	56,220	48,487*	1,159						
Modalität	0,405	1,000	0,405	0,351	0,560	0,002	0,002	0,018	0,087
Fehler (Modalität)	21,895	19,000	1,152						
Lautsprecher x Modalität	0,920	4,000	0,23	0,542	0,706	0,005	0,005	0,028	0,174
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	32,280	76.000	0,425						

Tabelle A.2: Attribut *Tiefen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	47,430	4,000	11,858	17,543	0,000	0,194	0,205	0,480	1,000
Fehler (Lautsprecher)	51,370	76,000	0,676						
Modalität	11,045	1,000	11,045	12,910	0,002	0,045	0,057	0,405	0,926
Fehler (Modalität)	16,255	19,000	0,856						
Lautsprecher x Modalität	2,530	2,569*	0,985	1,182	0,323	0,010	0,014	0,059	0,277
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	40,670	48,806*	0,833						

Tabelle A.3: Attribut *Härte*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Lautsprecher	18,880	2,843*	6,640	6,628	0,001	0,096	0,103	0,259	0,957
Fehler (Lautsprecher)	54,120	54,026*	1,002						
Modalität	10,580	1,000	10,580	20,896	0,000	0,054	0,061	0,524	0,991
Fehler (Modalität)	9,620	19,000	0,506						
Lautsprecher x Modalität	3,320	4,000	0,830	1,558	0,194	0,017	0,0020	0,076	0,460
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	40,480	76,000	0,533						

Tabelle A.4: Attribut *Volumen*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Lautsprecher	43,980	4,000	10,995	15,880	0,000	0,193	0,215	0,455	1,000
Fehler (Lautsprecher)	52,620	76,000	0,692						
Modalität	19,845	1,000	19,845	27,613	0,000	0,087	0,110	0,592	0,999
Fehler (Modalität)	13,655	19,000	0,719						
Lautsprecher x Modalität	3,680	4,000	0,920	1,478	0,217	0,016	0,022	0,072	0,438
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	47,320	76,000	0,623						

Tabelle A.5: Attribut *Lautheit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Lautsprecher	3,130	4,000	0,782	1,832	0,131	0,029	0,030	0,088	0,532
Fehler (Lautsprecher)	32,470	76,000	0,427						
Modalität	0,180	1,000	0,180	0,356	0,558	0,002	0,002	0,018	0,088
Fehler (Modalität)	9,620	19,000	0,506						
Lautsprecher x Modalität	1,570	4,000	0,392	1,164	0,333	0,015	0,016	0,058	0,349
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	25,630	76,000	0,337						

Tabelle A.6: Attribut *Klarheit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Lautsprecher	5,870	4,000	1,468	2,673	0,038	0,036	0,040	0,123	0,718
Fehler (Lautsprecher)	41,730	76,000	0,549						
Modalität	11,520	1,000	11,520	14,710	0,001	0,071	0,075	0,436	0,953
Fehler (Modalität)	14,880	19,000	0,783						
Lautsprecher x Modalität	2,930	4,000	0,733	1,246	0,299	0,018	0,020	0,062	0,372
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	44,670	76,000	0,588						

Tabelle A.7: Attribut *Natürlichkeit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Lautsprecher	25,670	4,000	6,418	8,507	0,000	0,142	0,153	0,309	0,998
Fehler (Lautsprecher)	57,330	76,000	0,754						
Modalität	12,005	1,000	12,005	23,527	0,000	0,066	0,078	0,553	0,996
Fehler (Modalität)	9,695	19,000	0,510						
Lautsprecher x Modalität	0,670	4,000	0,168	0,310	0,871	0,004	0,005	0,016	0,116
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	41,130	76,000	0,541						

Tabelle A.8: Attribut *Klangqualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	32,520	4,000	8,130	12,240	0,000	0,173	0,184	0,392	1,000
Fehler (Lautsprecher)	50,480	76,000	0,664						
Modalität	9,245	1,000	9,245	25,624	0,000	0,049	0,060	0,574	0,998
Fehler (Modalität)	6,855	19,000	0,361						
Lautsprecher x Modalität	2,080	4,000	0,520	0,770	0,548	0,011	0,014	0,039	0,236
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	51,320	76,000	0,675						

Tabelle A.9: Attribut *Helligkeit*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	182,330	2,358*	77,328	54,410	0,000	0,591	0,592	0,741	1,000
Fehler (Lautsprecher)	63,670	44,800*	1,421						
Modalität	0,020	1,000	0,020	0,045	0,834	0,000	0,000	0,002	0,055
Fehler (Modalität)	8,380	19,000	0,441						
Lautsprecher x Modalität	0,630	2,052*	0,307	0,631	0,541	0,002	0,005	0,032	0,149
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	18,970	38,988*	0,487						

Tabelle A.10: Attribut *visuelle Qualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	21,870	4,000	5,468	3,203	0,017	0,086	0,086	0,144	0,804
Fehler (Lautsprecher)	129,730	76,000	1,707						
Modalität	1,620	1,000	1,620	3,857	0,064	0,006	0,007	0,169	0,462
Fehler (Modalität)	7,980	19,000	0,420						
Lautsprecher x Modalität	1,030	4,000	0,258	0,715	0,584	0,004	0,004	0,036	0,221
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	27,370	76,000	0,360						

Tabelle A.11: Attribut *Größe*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	219,487	4,000	54,872	114,212	0,000	0,455	0,533	0,857	1,000
Fehler (Lautsprecher)	36,513	76,000	0,480						
Modalität	6,587	1,285*	5,125	3,644	0,059	0,014	0,033	0,161	0,505
Fehler (Modalität)	34,347	24,418*	1,407						
Lautsprecher x Modalität	63,413	4,550*	13,936	16,508	0,000	0,132	0,248	0,465	1,000
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	72,987	86,456*	0,844						

Tabelle A.12: Attribut *Wert*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Lautsprecher	61,447	4,000	15,362	16,362	0,000	0,198	0,208	0,463	1,000
Fehler (Lautsprecher)	71,353	76,000	0,939						
Modalität	6,720	2,000	3,360	3,761	0,032	0,022	0,028	0,165	0,652
Fehler (Modalität)	33,947	38,000	0,893						
Lautsprecher x Modalität	9,513	4,799*	1,982	1,730	0,138	0,031	0,039	0,083	0,561
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	104,487	91,183*	1,146						

Tabelle A.13: Attribut *Gesamtqualität*, Varianzanalyse, Kopräsenz-Paradigma

Faktor	QS Typ III	df	MQ	F	p	η^2	η_g^2	η_p^2	Teststärke
Lautsprecher	33,947	4,000	8,487	9,629	0,000	0,122	0,129	0,336	0,999
Fehler (Lautsprecher)	66,987	76,000	0,881						
Modalität	5,627	2,000	2,813	3,786	0,032	0,020	0,024	0,166	0,655
Fehler (Modalität)	28,240	38,000	0,743						
Lautsprecher x Modalität	8,373	8,000	1,047	1,639	0,118	0,030	0,035	0,079	0,705
Fehler (Lautsprecher x Modalität)	97,093	152,000	0,639						

A.2 Konfliktreiz-Paradigma

Tabelle A.14: Attribut *Höhen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	QS Typ III	df	MQ	F	p	η^2	η_g^2	η_p^2	Teststärke
Akustisch	6,628	2,577*	2,572	2,165	0,113	0,015	0,016	0,102	0,480
Fehler (Akustisch)	58,172	48,965*	1,188						
Optisch	0,608	2,586*	0,235	0,257	0,828	0,001	0,002	0,013	0,093
Fehler (Optisch)	44,992	49,142*	0,916						
Akustisch x Optisch	17,632	6,721*	2,623	1,948	0,070	0,040	0,041	0,093	0,735
Fehler (Optisch x Akustisch)	171,968	127,700*	1,347						

Tabelle A.15: Attribut *Tiefen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	QS Typ III	df	MQ	F	p	η^2	η_g^2	η_p^2	Teststärke
Akustisch	60,392	4,000	15,098	19,045	0,000	0,124	0,128	0,501	1,000
Fehler (Akustisch)	60,248	76,000	0,793						
Optisch	2,092	2,626*	0,797	0,573	0,613	0,004	0,005	0,029	0,153
Fehler (Optisch)	69,348	49,892*	1,390						
Akustisch x Optisch	13,328	6,717*	1,984	1,458	0,191	0,027	0,031	0,071	0,584
Fehler (Optisch x Akustisch)	173,632	127,621*	1,361						

Tabelle A.16: Attribut *Härte*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	QS Typ III	df	MQ	F	p	η^2	η_g^2	η_p^2	Teststärke
Akustisch	39,332	2,359*	16,671	10,422	0,000	0,096	0,099	0,354	0,991
Fehler (Akustisch)	71,708	44,828*	1,600						
Optisch	6,652	4,000	1,663	2,394	0,058	0,016	0,018	0,112	0,664
Fehler (Optisch)	52,788	76,000	0,695						
Akustisch x Optisch	5,548	16,000	0,347	0,709	0,784	0,017	0,015	0,036	0,487
Fehler (Optisch x Akustisch)	148,612	304,000	0,489						

Tabelle A.17: Attribut *Volumen*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	65,768	4,000	16,442	22,349	0,000	0,136	0,139	0,540	1,000
Fehler (Akustisch)	55,912	76,000	0,736						
Optisch	2,308	4,000	0,577	0,611	0,656	0,005	0,006	0,031	0,193
Fehler (Optisch)	71,772	76,000	0,944						
Akustisch x Optisch	7,712	7,405*	1,041	0,780	0,612	0,016	0,019	0,039	0,337
Fehler (Optisch x Akustisch)	187,808	140,699*	1,335						

Tabelle A.18: Attribut *Lautheit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	1,392	4,000	0,348	0,943	0,444	0,010	0,010	0,047	0,285
Fehler (Akustisch)	28,048	76,000	0,369						
Optisch	1,812	4,000	0,453	1,303	0,277	0,010	0,010	0,064	0,389
Fehler (Optisch)	26,428	76,000	0,348						
Akustisch x Optisch	5,448	7,702*	0,707	1,276	0,262	0,022	0,022	0,063	0,560
Fehler (Optisch x Akustisch)	81,112	146,335*	0,554						

Tabelle A.19: Attribut *Klarheit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	9,908	2,510*	3,948	3,844	0,020	0,037	0,038	0,168	0,737
Fehler (Akustisch)	48,972	47,682*	1,027						
Optisch	3,188	4,000	0,797	2,252	0,071	0,009	0,009	0,106	0,633
Fehler (Optisch)	26,892	76,000	0,354						
Akustisch x Optisch	5,532	8,574*	0,645	0,792	0,619	0,016	0,017	0,040	0,373
Fehler (Optisch x Akustisch)	132,788	162,903*	0,815						

Tabelle A.20: Attribut *Natürlichkeit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	50,268	4,000	12,567	20,316	0,000	0,121	0,123	0,517	1,000
Fehler (Akustisch)	47,012	76,000	0,619						
Optisch	1,588	4,000	0,397	0,579	0,679	0,004	0,004	0,030	0,184
Fehler (Optisch)	52,092	76,000	0,685						
Akustisch x Optisch	6,852	16,000	0,428	0,827	0,655	0,016	0,019	0,042	0,568
Fehler (Optisch x Akustisch)	157,468	304,000	0,518						

Tabelle A.21: Attribut *Klangqualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	64,088	2,749*	23,316	12,217	0,000	0,137	0,141	0,391	0,999
Fehler (Akustisch)	99,672	52,226*	1,908						
Optisch	5,388	4,000	1,347	1,742	0,150	0,012	0,014	0,084	0,509
Fehler (Optisch)	58,772	76,000	0,773						
Akustisch x Optisch	8,872	16,000	0,555	1,189	0,275	0,019	0,022	0,059	0,771
Fehler (Optisch x Akustisch)	141,768	304,000	0,466						

Tabelle A.22: Attribut *Helligkeit*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	1,132	4,000	0,283	1,478	0,217	0,001	0,004	0,072	0,438
Fehler (Akustisch)	14,548	76,000	0,191						
Optisch	490,472	2,042*	240,203	63,477	0,000	0,616	0,618	0,770	1,000
Fehler (Optisch)	146,808	38,796*	3,784						
Akustisch x Optisch	1,788	4,832*	0,370	0,718	0,607	0,002	0,006	0,036	0,245
Fehler (Optisch x Akustisch)	47,332	91,813*	0,516						

Tabelle A.23: Attribut *visuelle Qualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	0,428	4,000	0,107	0,522	0,720	0,001	0,001	0,027	0,169
Fehler (Akustisch)	15,572	76,000	0,205						
Optisch	36,508	4,000	9,127	2,283	0,068	0,060	0,060	0,107	0,640
Fehler (Optisch)	303,892	76,000	3,999						
Akustisch x Optisch	2,112	6,626*	0,319	0,670	0,689	0,004	0,004	0,034	0,272
Fehler (Optisch x Akustisch)	59,888	125,897*	0,476						

Tabelle A.24: Attribut *Größe*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η^2_g	η^2_p	**Teststärke**
Akustisch	0,388	4,000	0,097	0,677	0,610	0,000	0,001	0,034	0,211
Fehler (Akustisch)	10,892	76,000	0,143						
Optisch	671,408	2,828*	237,383	133,060	0,000	0,709	0,711	0,875	1,000
Fehler (Optisch)	95,872	53,739*	1,784						
Akustisch x Optisch	2,732	6,592*	0,414	1,311	0,253	0,003	0,010	0,065	0,525
Fehler (Optisch x Akustisch)	39,588	125,250*	0,316						

Tabelle A.25: Attribut *Wert*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Akustisch	5,212	4,000	1,303	3,329	0,014	0,012	0,014	0,149	0,821
Fehler (Akustisch)	29,748	76,000	0,391						
Optisch	47,872	4,000	11,968	5,820	0,000	0,111	0,114	0,234	0,977
Fehler (Optisch)	156,288	76,000	2,056						
Akustisch x Optisch	7,988	6,319*	1,264	1,387	0,223	0,019	0,021	0,068	0,539
Fehler (Optisch x Akustisch)	109,452	120,063*	0,912						

Tabelle A.26: Attribut *Gesamtqualität*, Varianzanalyse, Konfliktreiz-Paradigma

Faktor	**QS Typ III**	**df**	**MQ**	**F**	**p**	η^2	η_g^2	η_p^2	**Teststärke**
Akustisch	30,188	2,576*	11,721	9,840	0,000	0,069	0,072	0,341	0,992
Fehler (Akustisch)	58,292	48,937*	1,191						
Optisch	12,068	2,625*	4,597	2,155	0,113	0,028	0,030	0,102	0,483
Fehler (Optisch)	106,412	49,875*	2,134						
Akustisch x Optisch	5,472	6,621*	0,826	0,720	0,648	0,013	0,014	0,036	0,291
Fehler (Optisch x Akustisch)	144,448	125,807*	1,148						

B Regression

B.1 Kopräsenz-Paradigma

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,988	0,976	0,973	
Tiefen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,242	0,026	9,385	0,000
	Klangqualität	0,837	0,0468	17,910	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,948	0,899	0,886	
Volumen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,205	0,053	3,880	0,005
	Klangqualität	0,764	0,091	8,441	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,725	0,525	0,466	
Klarheit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	-0,245	0,203	-1,207	0,262
	Klangqualität	1,065	0,358	2,974	0,018

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,969	0,940	0,932	
Natürlichkeit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,146	0,042	3,493	0,008
	Klangqualität	1,037	0,093	11,154	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,942	0,887	0,873	
Härte		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,429	0,060	7,183	0,000
	Klangqualität	-1.089	0,137	-7,934	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,974	0,949	0,942	
Tiefen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,269	0,034	7,808	0,000
	Gesamtqualität	0,757	0,062	12,151	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,925	0,855	0,837	
Volumen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,236	0,058	4,059	0,004
	Gesamtqualität	0,683	0,099	6,879	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,710	0,505	0,443	
Klarheit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	-0,169	0,190	-0,891	0,399
	Gesamtqualität	0,956	0,335	2,855	0,021

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,932	0,869	0,852	
Natürlichkeit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0.184	0.057	3.256	0.012
	Gesamtqualität	0.913	0.126	7.27	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,960	0,922	0,912	
Klangqualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0.056	0.048	1.151	0.283
	Gesamtqualität	0.880	0.091	9.691	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,741	0,549	0,493	
visuelle Qualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,267	0,085	3,163	0,013
	Gesamtqualität	0.751	0,241	3,120	0,0142

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,693	0,480	0,440	
Wert		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,112	0,0878	1,270	0,226
	Gesamtqualität	0,544	0,157	3,462	0,004

		R	R^2	korr. R^2	
Wert		0,857	0,735	0,701	
Klangqualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,019	0,085	0,228	0,826
	Wert	0,748	0,159	4,706	0,001

		R	R^2	korr. R^2	
Wert		0,670	0,448	0,379	
visuelle Qualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0.298	0.145	2.054	0.074
	Wert	1.053	0.413	2.547	0.034

B.2 Konfliktreiz

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,784	0,615	0,598	
Tiefen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,168	0,059	2,834	0,009
	Klangqualität	0,797	0,132	6,058	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,891	0,794	0,785	
Volumen		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,060	0,048	1,238	0,228
	Klangqualität	0,906	0,096	9,419	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,881	0,775	0,766	
Klarheit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	-0,729	0,127	-5,738	0,000
	Klangqualität	1,784	0,200	8,908	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Klangqualität		0,917	0,842	0,835	
Natürlichkeit		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,060	0,042	1,424	0,168
	Klangqualität	1,060	0,096	11,059	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,920	0,847	0,840	
Klangqualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,062	0,0336	1,848	0,078
	Gesamtqualität	0,718	0,064	11,262	0,000

		R	R^2	korr. R^2	
Gesamtqualität		0,488	0,238	0,205	
visuelle Qualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,259	0,060	4,349	0,000
	Gesamtqualität	0,539	0,201	2,680	0,013

		R	R^2	korr. R^2	
Wert		0,399	0,159	0,122	
Klangqualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,194	0,089	2,175	0,040
	Wert	0,352	0,169	2,084	0,048

		R	R^2	korr. R^2	
Wert		0,455	0,207	0,172	
visuelle Qualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,260	0,069	3,784	0,001
	Wert	0,569	0,232	2,450	0,022

		R	R^2	korr. R^2	
Wert		0,491	0,241	0,208	
Gesamtqualität		**B**	**Std-Fehler**	**t**	**p**
	Konstante	0,143	0,090	1,582	0,127
	Wert	0,555	0,205	2,702	0,013

C Polaritätsprofile

C.1 Kopräsenz-Paradigma

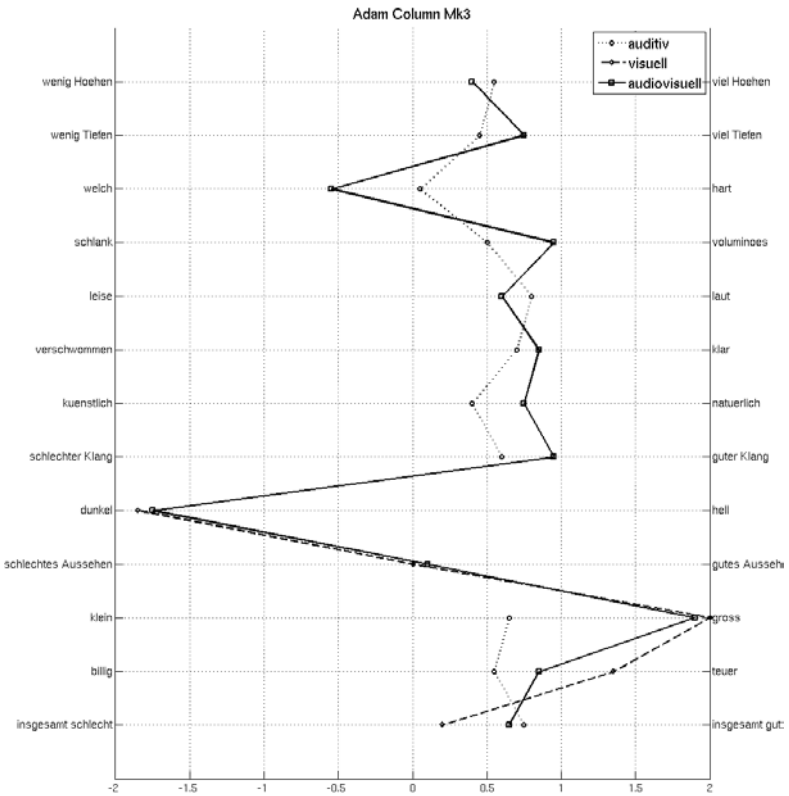


Abbildung C.1: Polaritätsprofil des *Adam Column Mk3* im KopräsenzParadigma

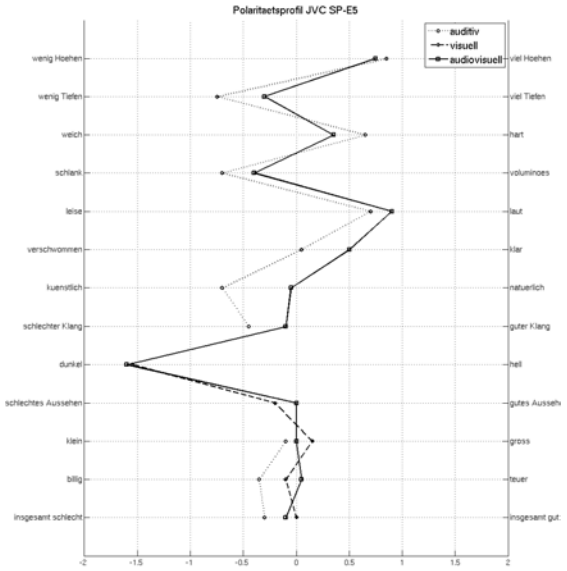


Abbildung C.2: Polaritätsprofil des *JVC SP-E5* im Kopräsenz-Paradigma

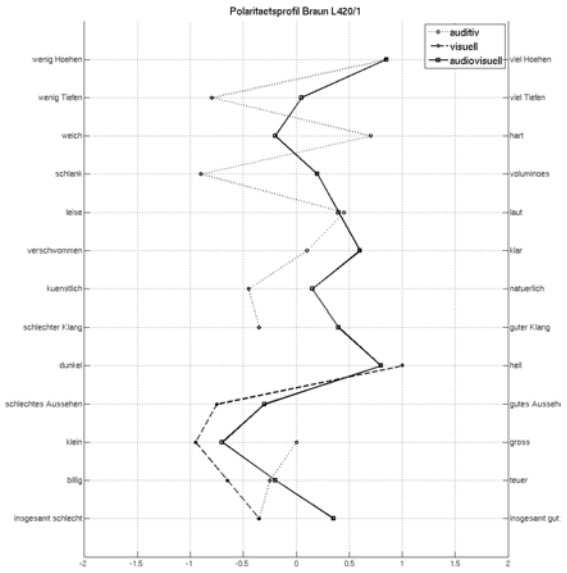


Abbildung C.3: Polaritätsprofil des *Braun L420/1* im Kopräsenz-Paradigma

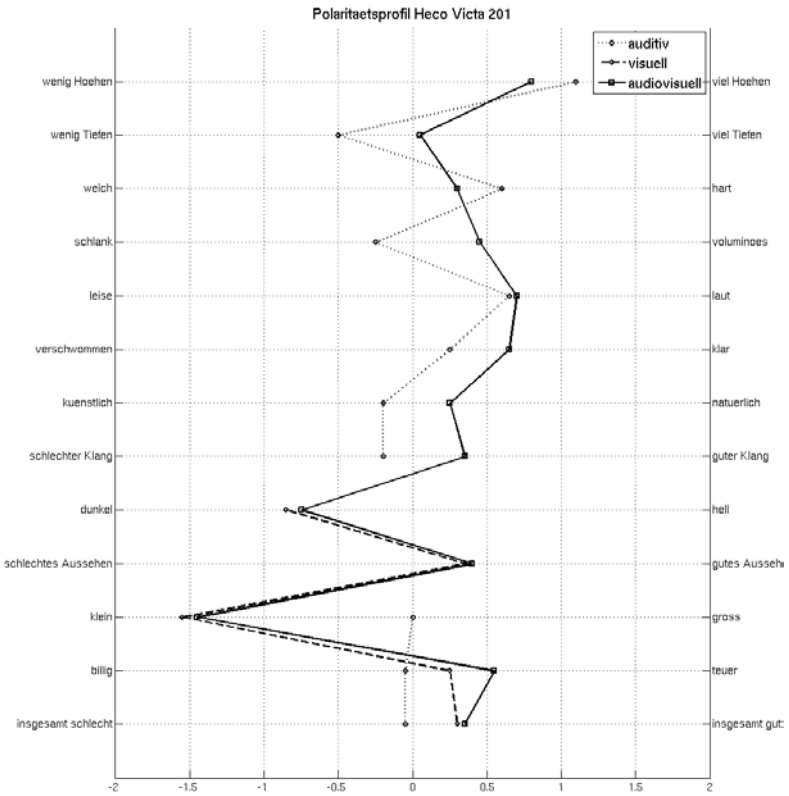


Abbildung C.4: Polaritätsprofil des *Heco Victa 201* im Kopräsenz-Paradigma

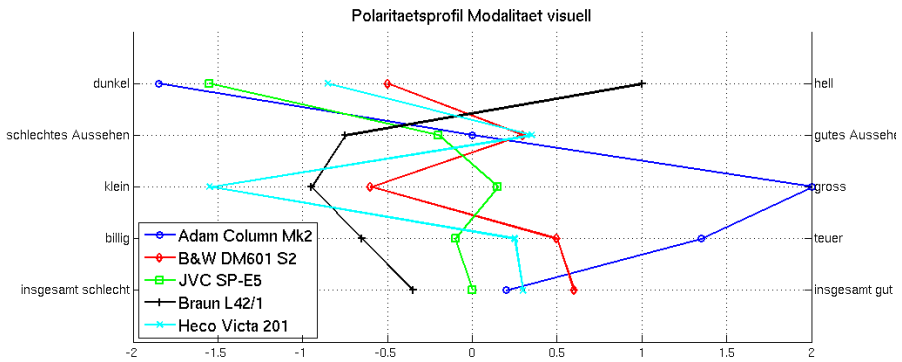


Abbildung C.5: Polaritätsprofil für die Modalität *visuell* Kopräsenz-Paradigma

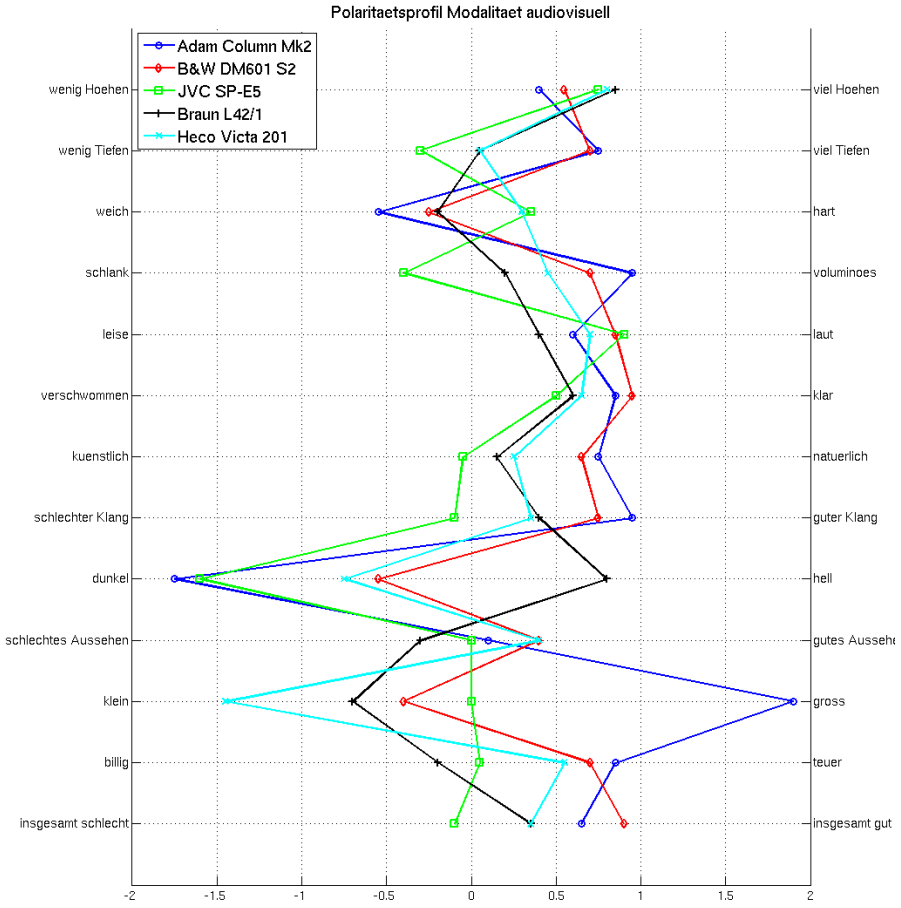
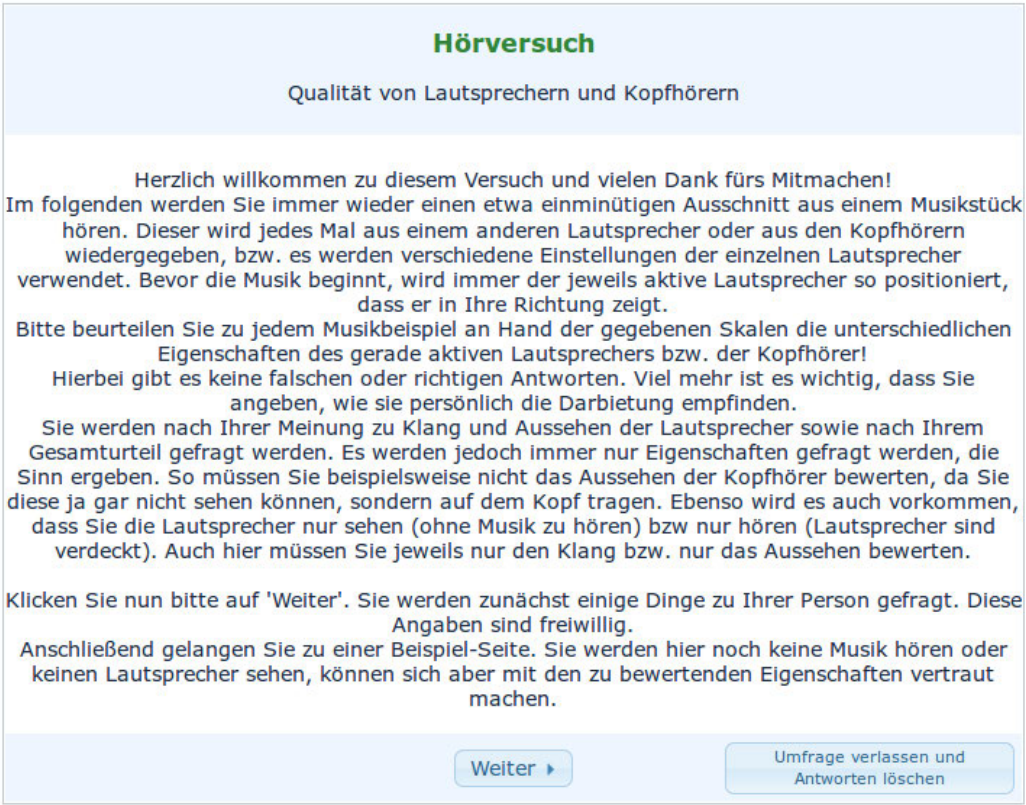


Abbildung C.6: Polaritätsprofil für die Modalität *audiovisuell* im Kopräsenz-Paradigma

D LimeSurvey

D.1 Versuchsanweisungen



Hörversuch

Qualität von Lautsprechern und Kopfhörern

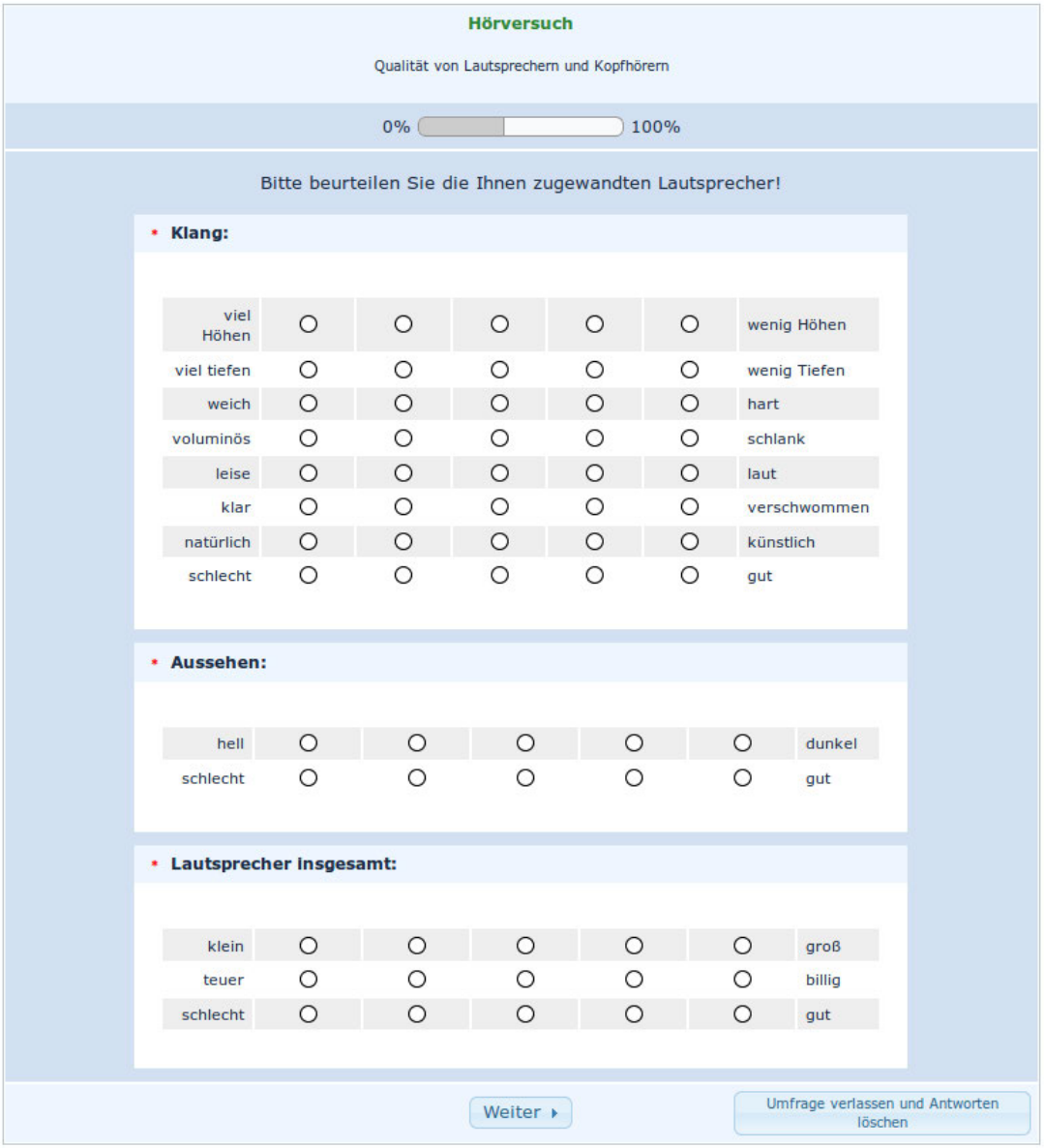
Herzlich willkommen zu diesem Versuch und vielen Dank fürs Mitmachen!
Im folgenden werden Sie immer wieder einen etwa einminütigen Ausschnitt aus einem Musikstück hören. Dieser wird jedes Mal aus einem anderen Lautsprecher oder aus den Kopfhörern wiedergegeben, bzw. es werden verschiedene Einstellungen der einzelnen Lautsprecher verwendet. Bevor die Musik beginnt, wird immer der jeweils aktive Lautsprecher so positioniert, dass er in Ihre Richtung zeigt.
Bitte beurteilen Sie zu jedem Musikbeispiel an Hand der gegebenen Skalen die unterschiedlichen Eigenschaften des gerade aktiven Lautsprechers bzw. der Kopfhörer!
Hierbei gibt es keine falschen oder richtigen Antworten. Viel mehr ist es wichtig, dass Sie angeben, wie sie persönlich die Darbietung empfinden.
Sie werden nach Ihrer Meinung zu Klang und Aussehen der Lautsprecher sowie nach Ihrem Gesamturteil gefragt werden. Es werden jedoch immer nur Eigenschaften gefragt werden, die Sinn ergeben. So müssen Sie beispielsweise nicht das Aussehen der Kopfhörer bewerten, da Sie diese ja gar nicht sehen können, sondern auf dem Kopf tragen. Ebenso wird es auch vorkommen, dass Sie die Lautsprecher nur sehen (ohne Musik zu hören) bzw nur hören (Lautsprecher sind verdeckt). Auch hier müssen Sie jeweils nur den Klang bzw. nur das Aussehen bewerten.

Klicken Sie nun bitte auf 'Weiter'. Sie werden zunächst einige Dinge zu Ihrer Person gefragt. Diese Angaben sind freiwillig.
Anschließend gelangen Sie zu einer Beispiel-Seite. Sie werden hier noch keine Musik hören oder keinen Lautsprecher sehen, können sich aber mit den zu bewertenden Eigenschaften vertraut machen.

Weiter ▸ | Umfrage verlassen und Antworten löschen

Abbildung D.1: Fragebogen in *LimeSurvey*, Erklärung des Versuchs

D.2 Fragebögen



Hörversuch

Qualität von Lautsprechern und Kopfhörern

0% 100%

Bitte beurteilen Sie die Ihnen zugewandten Lautsprecher!

• **Klang:**

viel Höhen	○	○	○	○	○	wenig Höhen
viel tiefen	○	○	○	○	○	wenig Tiefen
weich	○	○	○	○	○	hart
voluminös	○	○	○	○	○	schlank
leise	○	○	○	○	○	laut
klar	○	○	○	○	○	verschwommen
natürlich	○	○	○	○	○	künstlich
schlecht	○	○	○	○	○	gut

• **Aussehen:**

hell	○	○	○	○	○	dunkel
schlecht	○	○	○	○	○	gut

• **Lautsprecher insgesamt:**

klein	○	○	○	○	○	groß
teuer	○	○	○	○	○	billig
schlecht	○	○	○	○	○	gut

Weiter ▸ Umfrage verlassen und Antworten löschen

Abbildung D.2: Fragebogen in *LimeSurvey*, auditive, visuelle und audiovisuelle Attribute; auf Fragebögen für rein optische bzw. rein akustische Stimuli fehlten die auditiven bzw. die visuellen Bewertungen

D.3 osc-web

Dieser Code wurde in die Fragebogen-Seiten eingefügt, um OSC-Nachrichten zu verschicken. Die Werte dieser Nachrichten sind Beispiele und variieren je nach aktuellem optischen und akustischem Stimulus.

```
<script src "http://127.0.0.1:8081/socket.io/socket.io.js"></script>
<script>
socket io.connect('http://127.0.0.1', { port: 8081, rememberTransport: false});
console.log('oi');
socket.on('connect', function() {
    // sends to socket.io server the host/port of oscServer
    // and oscClient
    socket.emit('config',
        {
            server: {
                port: 3333,
                host: '127.0.0.1'
            },

            client: {
                port: 6668,
                host: '192.168.0.109'
            }
        }
    );
});

socket.on('message', function(obj) {
    var status document.getElementById("status");
    status.innerHTML obj[0];
    console.log(obj);
});

socket.emit('message', '/stopstimulus', 0);
socket.emit('message', '/lsakustisch', 3);
socket.emit('message', '/content', 1);
socket.emit('message', '/moveleft', 5);
socket.emit('message', '/moveright', 0);
</script>
```

E Matlab-Funktionen

E.1 reset_turntable.m

Diese Funktion initiiert eine Verbindung zum Steuergerät des Drehtellers und setzt diesen zurück in die Nullposition. Die Funktion wurde am Fachbereich Audiokommunkation implementiert.

```
% First setup of Outline Turntable connected to frontpanel
% "Computer Parallel Port" of Outline ET2 (device B)
%
% - opens LPT-Port I/O Lines
% - checks for correctness of stepwidth and range
% - resets turntable to position 0  (zero)
%
% [ret] returns 1 if successful

clear all
close all
clc

global position setup LptIO

% setup
setup.outline.lpt_port          'LPT1';
setup.outline.RESET_LEFTWARD    0;
setup.outline.rot_stepwidth     2.5;

%-----------------------------------------------
% open LPT port I/O object
LptIO    digitalio('parallel',setup.outline.lpt_port);

% Assign I/O ports
setup.outline.Outline_OUT addline(LptIO ,0:7,'out');    % write to Pins 2-9
setup.outline.Outline_IN addline(LptIO,8:11,'in');    % read from Pin 15/13/12/10

% Declarations, definitions for communicaion with Turntable
```

```
STEPWIDTH_PER_EDGE        1.25;
%write
UNITA_MOVEFORWARD         logical([0 0 0 1 0 0 0 0]);
UNITB_MOVEFORWARD         logical([0 0 0 0 1 0 0 0]);
UNITA_MOVEBACK            logical([0 0 0 0 0 1 0 0]);
UNITB_MOVEBACK            logical([0 0 0 0 0 0 1 0]);
UNITS_STOP                logical([0 0 0 0 0 0 0 0]);
%read
UNITA_STEPS               setup.outline.Outline_IN(1);
UNITB_STEPS               setup.outline.Outline_IN(2);
UNITA_POS                 setup.outline.Outline_IN(3);
UNITB_POS                 setup.outline.Outline_IN(4);

%-----------------------------------------------------
%% check stepwidth
% if rem(setup.outline.rot_stepwidth,2.5)~ 0;
%     error('Turntable stepsize no multiple of 2.5 !')
% end
%
%% check range and stepwidth
% if rem(360,setup.outline.rot_stepwidth)~ 0;
%     error('Unsuitable combination of range an stepsize for turntable!')
% end

%-----------------------------------------------------
%resetUnitB
if setup.outline.RESET_LEFTWARD
    %resetUnitB leftward:
    while getvalue(UNITA_POS)~ 0
        putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITA_MOVEBACK)
    end
    putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITS_STOP)
else
    %resetUnitB rightward:
    while getvalue(UNITA_POS)~ 0
        putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITA_MOVEFORWARD)
    end
    putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITS_STOP)
end

fprintf('Turntable resetted. \n')

% keep position in workspace
position.old_rot 0;
```

E.2 move_turntable.m

Diese Funktion weist das Steuergerät der Drehteller an, die Teller an die gewünschte Position zu drehen. Sie berechnet zuvor, in welche Richtung gedreht werden muss, um den kürzeren Weg zu nehmen. Die Funktion wurde am Fachbereich Audiokommunkation implementiert und in diesem Versuch um die Berechnung des kürzesten Weges erweitert.

```
% Repositioning Amtec turntable device B to a new position [0-360 ]
%
% Turntable has to be referenced by 'reset_turntable.m'
% so GLOBAL 'LptIO' already exists in workspace
%
% [ret] returns 1 if successful
%
% position     phi [+- 180 ] in [ ]
%
% lefthanded!
% phi   -180  means: to the left
%
% call:
%
% function ret    move_turntable(position);
%-----------------------------------------------------------------------%
function ret    move_turntable(position_new);

if mod(position_new,2.5) ~  0
    error('new position not multiple of 2.5')
end

global setup LptIO position;

% check number of function args, set defaults
error(nargchk(1,2,nargin));


tmp    exist('LptIO');
if tmp ~  1
    warning('LPT-Port not properly initialized.')
end

% Declarations, definitions for communication with Turntable
STEPWIDTH_PER_EDGE        1.25;
%write
```

```
UNITA_MOVEFORWARD        logical([0 0 0 1 0 0 0 0]);
UNITB_MOVEFORWARD        logical([0 0 0 0 1 0 0 0]);
UNITA_MOVEBACK           logical([0 0 0 0 0 1 0 0]);
UNITB_MOVEBACK           logical([0 0 0 0 0 0 1 0]);
UNITS_STOP               logical([0 0 0 0 0 0 0 0]);
%read:
UNITA_STEPS              setup.outline.Outline_IN(1);
UNITB_STEPS              setup.outline.Outline_IN(2);
UNITA_POS                setup.outline.Outline_IN(3);
UNITB_POS                setup.outline.Outline_IN(4);

% Get current and new position
ActPos position.old_rot;
TargPos position_new;


%% Find out the shortest way, backwards or forwards:
TargPosOrig   TargPos; %Just to remember the original TargPos for later saving
distance_backw   0;
distance_forw   0;

if TargPos > ActPos
    distance_forw   abs(TargPos - ActPos)
    distance_backw   abs(ActPos + (360-TargPos))
    if distance_backw < distance_forw
        TargPos   -(360-TargPos);
    end
elseif TargPos < ActPos
    distance_forw   abs((360-ActPos) + TargPos)
    distance_backw   abs(ActPos - TargPos)
    if distance_backw > distance_forw
        TargPos   360+TargPos;
    end

end

TargPos
%return

tmpold getvalue(UNITA_STEPS);


% Move to TargPos
if TargPos<ActPos        % Move to the left (backward)
    while TargPos~ ActPos
```

```
        putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITA_MOVEBACK)
        %read current step (0/1)
        tmp getvalue(UNITA_STEPS);
        if tmp~ tmpold
            ActPos ActPos-STEPWIDTH_PER_EDGE;
            tmpold ~tmpold;
        end
    end
    %stop turntable
    putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITS_STOP)

elseif TargPos>ActPos    % Move to the right (foreward)
    while TargPos~ ActPos
        putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITA_MOVEFORWARD)

        %read current step (0/1)
        tmp getvalue(UNITA_STEPS);
        if tmp~ tmpold;
            ActPos ActPos+STEPWIDTH_PER_EDGE;
            tmpold ~tmpold;
        end
    end
    %stop turntable
    putvalue(setup.outline.Outline_OUT,UNITS_STOP)
else
    display('Nothing to move.')
end


% write pos. as old to memory
position.old_rot    TargPosOrig;

ret 1;
```

E.3 setup_rightTable.m

Hiermit wird der Drehteller zurückgesetzt und ein UDP-Objekt erstellt, welches die via UDP verschickten OSC-Nachrichten empfangen kann. Es wird außerdem eine Callback-Funktion definiert, die aufgerufen wird, sobald ein Datenpaket empfangen wurde. Eine ähnliche Funktion *setup_leftTable.m* unterscheidet sich von dieser lediglich in der verwendeten IP-Adresse.

```
% Starte rechten Drehteller und erstelle
% ein UDP-Objekt. Definiere ausserdem eine
% Callback-Funktion, die aufgerufen wird,
% wenn ein Datenpaket eintrifft.

clear all
close all
clc

reset_turntable

right_table udp('192.168.0.109',9011,'LocalPort',9010)
right_table.DatagramReceivedFcn @outline_callback

fopen(right_table)
```

E.4 outline_callback.m

Werden Daten empfangen, liest diese Funktion deren Wert aus und dreht den Drehteller auf die entsprechende Position.

```
function outline_callback( object, event )
%   Callback-Funktion fuer den Datenempfang
%   des UDP-Objekts

degreestr   fscanf(object);
degree   str2num(degreestr);

move_turntable(degree);
end
```