Technische Universität Berlin

Studiengang Kommunikationswissenschaft

Zur perzeptiven Bewertung von binaural simulierten raumakustischen Umgebungen

Magisterarbeit

Vorgelegt von:

Eric Reiß

[redacted]

Betreuender Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Zweitgutachter: Dr. Hans Joachim Maempel

Berlin, den 10. Mai 2009

Eidesstattliche Erklärung

Die selbstständige und eigenständige Anfertigung dieser Magisterarbeit versichere ich an Eides statt.

Berlin, den 10. Mai 2009

Eric Reiß

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

Abbildugsverzeichnis ..... **V**

Tabellenverzeichnis ..... **VII**

Formelverzeichnis ..... **IX**

1. Einleitung **1**

Struktur der Arbeit *2*

2. Grundlagen - Stand der Forschung auf dem Gebiet "Suche nach Korrelation zwischen technischen und perzeptiven Maßen bezüglich Raumakustik" **3**

2.1. Frühe Untersuchungen zu diesem Thema *3*

2.2. Die Untersuchungen von Wilkens und Lehmann *5*

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann 7

Methodische Defizite der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann aus heutiger Sicht und Konkretisierung der Forschungsfrage für diese Magisterarbeit 12

2.3. Die Untersuchungen der letzten zwanzig Jahre *14*

2.4. Entwicklungen im Bereich der Binauralmesstechnik im Laufe der Zeit bis heute *15*

3. Die Methoden Zur Messung der Raumimpulsantworten **18**

3.1. Vorstellung der im Rahmen der Arbeit gemessenen Räume und der Kriterien die zu ihrer Auswahl führten *18*

Der große Saal im Friedrichstadtpalast 19

Das Audimax H105 an der TU- Berlin 20

Das Wiener Burgtheater 21

Der Kammersaal der Universität der Künste Berlin 23

Das Elektronische Studio der Technischen Universität Berlin 24

3.2. Das Messen mit der Sinussweep Technik *25*

Die verwendeten Messsignale bei den monauralen und binauralen Raumimpulsantwortmessungen 26

3.3. Der Lautsprecher der bei den Messungen zur Anwendung kam *27*

3.4. Die Messmikrofone und Messsyteme die bei den monauralen Messungen zum Einsatz kamen *29*
Das BEHRINGER ECM 8000 (omnidirektionales Messmikrofon) 29
Das EASERA Messsystem 30
Der Prinzipielle Messaufbau bei den Messungen der monauralen Raumimpulsantworten 30
3.5. Die Messmikrofone und Messsyteme die bei den binauralen Messungen zum Einsatz kamen *31*
Das Binaural Mess- und Wiedergabesystem FABIAN 31
Bauform und Materialien des FABIAN Messsystems 32
Die Wahl der Winkelschrittweite von Fabian 33
Laserpointer als Zieleinrichtung und Kompensationsmessung für die Zieleinrichtung ... 33
Die Mikrofone des FABIAN Systems 34
Die Soundkarte und die Mikrofonvorverstärker des FABIAN Systems 35
Der Prinzipieller Messaufbau bei den Messungen der binauralen Raumimpulsantworten 35
3.6. Das Postprocessing der Binauralsets *36*
3.7. Die Wiedergabe mit FABIAN *37*

4. Der Versuchsaufbau und die Durchführung der Messungen 38
4.1.Die Position des Lautsprechers *38*
4.2.Die Positionen des Messmikrofons und des Messroboters FABIAN *38*
4.3.Die Messung der monauralen und binauralen Raumimpulsantworten in den Räumen . *40*
Die Beschreibung der Messung der binauralen Raumimpulsantworten im Wiener Burgtheater 40
Die Beschreibung der Messung der BRIRs im Palast 42
Die Beschreibung der Messung der BRIRs im Kammersaal 44
Die Besonderheiten bei den Messungen im elektronischen Studio und Audimax 45
Die Beschreibung der Messung der im Elektronischen Studio 45
Die Beschreibung der Messung im Audimax 45
Die Messung der monauralen Raumimpulsantworten 46
4.4. Die Form der BRIR Datensätze bezüglich der räumlichen Auflösung *47*

5. Die Vorstellung der aus den monauralen Raumimpulsantworten zu bestimmenden physikalischen Parameter 48

Die Nachhallzeit 49

Die Early Decay Time EDT 49

Die Schwerpunktzeit 49

Die Risetime 50

Das Bassverhältnis 51

Das Deutlichkeitsmaß für Sprache 51

Das Klarheitsmaß für Musik 52

Der Artikulationsverlust für Sprache Al_{cons} 52

Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient IACC 53

Das Stärkemaß 54

Der Sprachverständlichkeitsindex STI 55

6. Die Methoden zur Erhebung der perzeptiven Maße 56

6.1. Die RGT Methode 56

6.2. Das Semantisches Differenzial 58

6.3. Der Versuchsaufbau und das Versuchsdesign 58

6.4. Der Versuchsablauf und die Durchführung des RGT Hörversuchs 61

Der Erste Teil des RGT Versuchs, das Erheben der Gegensatzpaare 61

Der zweite Teil der RGT, das Einsetzten der Gegensatzpaare in ein persönliches semantisches Differenzial 63

Die Auswertung der Clusteranalyse der RGT 63

6.5. Der Zweite Hörversuch 65

Der Versuchsablauf und die Durchführung des Semantischen-Differenzial-Versuchs 67

7. Die Auswertung 69

7.1. Die perzeptiven Maße 69

Die Bestimmung von Cronbach's Alpha 70

Die Hauptkomponentenanalyse 70

Die Korrelationen der perzeptiven Maße untereinander 75

Die Varianzanalyse der perzeptiven Daten 76

7.2. Die Auswertung der physikalischen Maße 78

Die Korrelationen der physikalischen Maße mit den Faktorenwerten 79
Die Korrelationen der physikalischen Maße untereinander.....80
Die Korrelation der physikalischen Maße mit den perzeptiven Maßen 81
Die Multiple Regression und die physikalischen Prädiktoren
der perzeptiven Merkmale.....82

8. Die Zusammenfassung.....84
9. Literaturverzeichnis 86
10. Anhang.....92

Abbildugsverzeichnis

Abbildung 1 entnommen bei Wilkens (1977), S. 18, Fig 2 7
Abbildung 2 Korrelation raumakustischer Kriterien mit Attributen
und Faktorwerten bei Lehmann(1980), S. 262, Fig 2 und S. 264, Fig 4 9
Abbildung 3 180° Blick auf die Bühne von Messposition 1 im Friedrichstadtpalast 19
Abbildung 4 180° Blick auf die Bühne von Messposition 2 im Friedrichstadtpalast 20
Abbildung 5 180° Blick von Messplatz 1 mit Bühnenblick im Audimax 20
Abbildung 6 180° Blick von Messplatz 2 mit Bühnenblick im Audimax 21
Abbildung 7 180° Blick von Messplatz 1 und Messplatz 2 im im Burgtheater 22
Abbildung 8 Kammersaal UdK, Bühnenblick von Messposition 1 und 2 im 180° Blick 23
Abbildung 9 180° Blick von der Messposition im Elektronisches Studio 24
Abbildung 10 Blockdiagramm des Messverfahrens mit
linearer Entfaltung aus Weinzierl(2008) S. 1115 26
Abbildung 11 Meyersound UPL-1 Aktivlautsprecher, l. bei der Messung
im Kammersaal, m. ohne Frontabdeckung, r. Mit Frontabdeckung wie bei Messung 27
Abbildung 12 Frequenzgang Meyersound UPL - 1 in 10 m Abstand im 28
Abbildung 13 Frequenzgang und Abstrahlcharakteristik BEHRINGER ECM 8000,
(Grafiken entstammen der Herstellerwebseite) 29
Abbildung 14 Blockdiagramm des Messaufbaus für die Messungen mit EASERA 30
Abbildung 15 Fabian Messroboter 31
Abbildung 16 Laserpointer in Aluminiumträger l. und am Halsgelenk r. 33
Abbildung 17 Für Fabian genutztes DPA Mikrofon und Frequenzgang
(entstammen der DPA homepage) 35
Abbildung 18 Blockschaltbild des Messaufbau für das FABIAN-System 36
Abbildung 19 Raumgrundrisse mit Messpositionen von Wilkens(1980), S.258 39
Abbildung 20 Burgtheater Messposition 1 und 41
Abbildung 21 Sitzplan Friedrichstadtpalast mit Messpositionen (1,2)
und Lautsprecherposition (LS) (Quelle: Website Friedrichstadtpalast) 43
Abbildung 22 schematischer Grundriss Kammersaal 44
Abbildung 23 Grundriss großes Studio mit Mess und 45
Abbildung 24 Messpositionen im Audimax (Quelle: Planamt der TU Berlin) 46
Abbildung 25 Flussdiagramm des Datenstroms aus Audio- und Steuerdaten 59

Abbildung 26 Vernetzung der Räume und Quellen in PD (Screenshot).....60
Abbildung 27 Eingabemaske (GUI) in Mathlab 61
Abbildung 28 Eingabemaske (GUI) in Mathlab für.....63
Abbildung 29 endgültiger Fragebogen mit allen Merkmalspaaren, Polaritäten sind sichtbar, Bezug zu Quelle, Raum, Klang oder Gesamteindrucksbezug ist verdeutlicht 66
Abbildung 30 Mathlab GUI für den zweiten Hörversuch, Das Semantische Differenzial(Screenshot) 67
Abbildung 31 Scree Plot erstellt mit SPSS (SPSS).....71
Abbildung 32 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 1(SPSS).....92
Abbildung 33 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 2(SPSS).....92
Abbildung 34 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 3(SPSS).....93
Abbildung 35 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 4(SPSS).....93
Abbildung 36 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 5(SPSS).....94
Abbildung 37 Daten in SPSS in der Messwiederholungsstruktur(SPSS) 94
Abbildung 38 Datenstruktur mit Gruppierungsvariablen(SPSS).....95
Abbildung 39 Technische Zeichnung und 3D Ansicht der Laserpointerzieleinrichtung 96
Abbildung 40 BRIR-Det x Merkmal(SPSS).....97
Abbildung 41 Hörposition x Merkmal(SPSS) 97
Abbildung 42 Raum x Merkmal(SPSS) 98
Abbildung 43 Quellsignal x Merkmal(SPSS).....98
Abbildung 44 Hörpositionen im Audimax x Merkmal(SPSS) 99
Abbildung 45 Hörpositionen Burgtheater x Merkmale(SPSS).....99
Abbildung 46 Hörpositionen Friedrichstadtpalast x Merkmale(SPSS).....100
Abbildung 47 Hörpositionen Kammersaal x Merkmale(SPSS) 100
Abbildung 48 Hörposition Elektronisches Studio x Merkmale(SPSS).....101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Die wichtigste Attribute für die drei perzeptiven Faktoren bei Wilkens.....8
Tabelle 2 Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse von Wilkens(1977),
S. 21, Tabelle 4.....10
Tabelle 3 Korrelationen der physikalischen Maße untereinander
bei Lehmann Abbildung aus Lehmann(1980) S. 262, Tabelle 4 11
Tabelle 4 Die BRIR Datensätze.....48
Tabelle 5 Verwendete Quellsignale.....60
Tabelle 6 Zusammensetzung der Versuchsteilnehmer 62
Tabelle 7 Merkmalpaare, die nach der Clusteranalyse der RGT hervortraten.....64
Tabelle 8 Merkmalspaare auf dem Fragebogen die der.....65
Tabelle 9 Die Versuchsteilnehmer des zweiten.....67
Tabelle 10 Liste der bipolaren Merkmalspaare nach ihrer ‚Umpolung'.....69
Tabelle 11 statistisches Reliabilitätsmaß Cronbach's Alpha (SPSS) 70
Tabelle 12 Die Korrelationen der perzeptiven Merkmale mit
vier perzeptiven Faktoren (SPSS) 72
Tabelle 13 Eigenwerte und Varianzanteile der Faktoren nach der
Hauptkomponentenanalyse (SPSS).....73
Tabelle 14 Die Korrelationen der perzeptiven Merkmale mit
fünf perzeptiven Faktoren (SPSS).....73
Tabelle 15 Varianzen von Raum Hoerposition und Quellsignal (SPSS).....77
Tabelle 16 Die Wertetabelle der physikalischen Maße 78
Tabelle 17 Korrelationen der physikalische Maße mit.....79
Tabelle 18 Physikalische Prädiktoren der perzeptiven Merkmale 83
Tabelle 19 Korrelationen der perzeptiven Merkmale untereinander(SPSS).....102
Tabelle 20 Korrelationen der physikalischen Parameter untereinander(SPSS) 103
Tabelle 21 Korrelationen der physikalischen Maße
mit den perzeptiven Merkmalen(SPSS).....104
Tabelle 22 physikalische Prädiktoren für Faktor 1(SPSS).....105
Tabelle 23 physikalische Prädiktoren für Faktor 2(SPSS).....105
Tabelle 24 physikalische Prädiktoren für Faktor 3(SPSS).....106
Tabelle 25 physikalische Prädiktoren für Faktor 4(SPSS).....106

Tabelle 26 physikalische Prädiktoren für die Attribute Halligkeit, Größe(SPSS) 107
Tabelle 27 physikalische Prädiktoren für die Attribute Umhüllung,
Weite und Diffusität(SPSS) 108
Tabelle 28 physikalische Prädiktoren für die Attribute Aufdringlichkeit und
Lautstärke(SPSS)..... 109
Tabelle 29 physikalische Prädiktoren für die Attribute Distanz und Härte(SPSS) 109
Tabelle 30 physikalische Prädiktoren für die Attribute Deutlichkeit,
Angenehmheit und Klarheit(SPSS)..... 110
Tabelle 31 physikalische Prädiktoren für die Attribute Helligkeit, Breite und Höhe(SPSS) 111

Formelverzeichnis

Formel 1 Faltungs Formel, Weinzierl (2008), S. 1095. 25

Formel 2 Nachhallzeit nach Sabine von 1923 Entnommen Weinzierl S.191 49

Formel 3 *Center time* Formel entnommen bei Weinzierl S197 50

Formel 4 Risetime Formel entnommen Wilkens Lehmann S 261 50

Formel 5 *Bassverhältnis* Formel entnommen bei Weinzierl S191 51

Formel 6 Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} Formel entnommen Weinzierl S 192 51

Formel 7 Klarheitsmaß für Musik C_{80} Formel entnommen Weinzierl S 199 52

Formel 8 Al_{cons} mit Bezug auf den Hallradius Formel entnommen bei Weinzierl S 193 52

Formel 9 Al_{cons} aus der IR , Nachhallenergie im Verhältnis zur

Direktschallenergie Formel entnommen bei Weinzierl S 193 52

Formel 10 IACF und IACC Formel entnommen aus Weinzierl S 200 53

Formel 11 Stärkemaß G nach Lehmann 54

Formel 12 Binominalkoeffizient n über k Tafelwerk S 30 61

1. Einleitung

Eine akustischen Umgebung erzeugt bei einem Menschen eine bestimmte akustische Wahrnehmung, Diese hängt stark von der Umgebung ab. In Räumen und Sälen wird bei akustischer Anregung ein akustischer Raumeindruck beim Hörer erzeugt. Wurden Räume gebaut wurde schon früh versucht die Hörsamkeit dieser vorherzusagen. Dazu wurden bereits damals physikalische Maße entwickelt die zum einen die Situation in einem Raum adäquat beschrieben und die im Weiteren dazu genutzt wurden in der Planung bereits Einfluss auf die spätere Akustik im Raum zu nehmen. Zur Planung und Einschätzung der Akustik von Räumen kommen meist physikalische Messmethoden zum Einsatz. Allerdings ist die Messung eines vom Menschen wahrgenommenen Raumeindrucks mit einem Messmikrofon, mit omnidirektionaler Richtcharakteristik und möglichst linearem Frequenzgang, nicht möglich. Psychologische Methoden, die Ergebnisse auf der perzeptiven Ebene liefern also die Komponente der menschlichen Wahrnehmung berücksichtigen sind hier nötig. Untersuchungen aus den 1970er Jahren nutzten bereits solche Methoden. Dabei kamen bereits auch die Binauraltechnik zum Einsatz.

Seit 2006 existiert an der Technischen Universität Berlin ein neuartiges über mehrere Freiheitsgrade freibewegliches dynamisches binaurales Mess- und Wiedergabesystem, das zum ersten mal die Möglichkeit bietet einen raumakustische Umgebung nahezu originalgetreu zu reproduzieren. Damit wurden in der vorliegenden Untersuchung die Untersuchungen von Wilkens und Lehmann (1970er) nachvollzogen. Dabei kamen auch in der Akustik damals unübliche psychometrische Verfahren wie die RGT-Methode zur Anwendung. Bereits aufgedeckte Zusammenhänge zwischen perzeptiven und physikalischen Raumakustischem Daten sollen hinterfragt werden und gegebenenfalls neue Erkenntnisse zum Thema gewonnen werden. Es soll versucht werden direkte zusammenhänge zwischen akustischer Wahrnehmung in Räumen und raumakustischen Maßen gefunden werden. Es wird weiterhin untersucht, ob eher der Raum an sich oder die Hörposition im Raum den Höreindruck maßgeblich beeinflusst.

Struktur der Arbeit

Um den Leser mit der behandelten Problematik vertraut zu machen, wird im Grundlagenteil zunächst ein geschichtlicher Abriss über den Forschungsstand zum Thema: Zusammenhang perzeptiver Bewertung von raumakustischen Umgebungen mit raumakustischen physikalischen Maßen dieser Säle, gegeben. Im Folgenden werden die zwei wichtigsten Untersuchungen zu diesem Thema von Wilkens und Lehmann dargestellt. Es folgt eine detaillierte Vorstellung der Räume und der Methoden zur Akquise der monauralen und binauralen Raumimpulsantworten. Im Untersuchungsteil wird die Versuchsdurchführung der Messungen beschrieben. Anschließend werden die psychometrischen Methoden zur Erhebung der perzeptiven Daten näher erläutert. Es schließt sich die Vorstellung der physikalischen Maße die zur Klärung der zu untersuchenden Zusammenhänge genutzt werden, an.
Abschließend folgt die tabellarische und grafische Präsentation der Versuchsergebnisse. Ein wichtiger Bestandteil des Kapitels Auswertung ist die Auseinandersetztung mit den Ergebnissen der statistischen Analysen.

2. Grundlagen - Stand der Forschung auf dem Gebiet "Suche nach Korrelation zwischen technischen und perzeptiven Maßen bezüglich Raumakustik"

2.1. Frühe Untersuchungen zu diesem Thema

Die in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchung hat die Erforschung der Korrelationen zwischen technischen und perzeptiven Maßen bezüglich Raumakustik zum Gegenstand. Es wird nach physikalischen Maßen gesucht, mit denen sich die Hörsamkeit von Räumen voraussagen lässt. Im Laufe der Zeit haben sich die Methoden zur Untersuchung dieser Zusammenhänge weiterentwickelt und verändert. Objektive raumakustische Kriterien wurden schon seit Beginn des 19.Jahrhunderts kreiert, aber erst die Schallspeicherung und Wiedergabeverfahren, mit denen man Schallfelder künstlich reproduzieren konnte (Kopfhörerwiedergabe, Lautsprecherwiedergabe), ermöglichten es, perzeptive Merkmale eines Raums und ihre Beziehung zu physikalischen akustischen Raumkriterien systematisch unter Laborbedingungen zu untersuchen.[1]

In frühen Untersuchungen aus den Jahren 1955 und 1962 führten Winckel[2] und Beranek[3] Interviews ohne Fragebogen mit Dirigenten und Kritikern durch. Es wurde versucht, Verknüpfungen der Urteile dieser Hörergruppe mit physikalischen Maßen zu finden. Beranek fand 18 Attribute zur Beschreibung von Konzertsaalakustik.[4] Die Befragungen erfolgten nicht während oder direkt nach Aufführungen, daher stammten die Bewertungen aus der Erinnerung. Diese Untersuchung fand demnach nicht unter Verwendung wissenschaftlicher Methoden statt. Das ist eine mögliche Erklärung, warum eine Bestätigung der aufgedeckten

---

[1] Sotriropoulou, A.G, Fleming, D. B.: " Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:II, Physical Room Acoustic Criteria Subjectively Significant". In: *ACUSTICA* 81 (1995). S 11.
[2] Winckel, F.: „Die besten Konzertsäle der Welt". *Baukunst und Werkform 8* (1955), S 751.
[3] Beranek, L.: *Music, acoustics and architecture,*.New York-London: Wiley & Sons, 1962.
[4] Sotriropoulou, A.G. und Hawkes, R.J. und Fleming, D. B.: „Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:I, Multidimensial- Description of Evaluations". In: *ACUSTICA* 81 (1995). S. 2.

Zusammenhänge in späteren Studien der 1970er Jahre durch Hawkes und Douglas[5], Gottlob[6] und Siebrasse[7] (Göttingen) nicht möglich war.
Parkin[8] benutzte für seine Interviews Fragebögen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass allen Versuchsteilnehmern dieselben Fragen gestellt wurden. Es folgten Untersuchungen durch Sommerville[9] und Kuhl[10], die einkanalig dargebotene Musikausschnitte aus verschiedenen Sälen nutzten.

Ein allgemein gültiges Gütekriterium, das sich in späteren Untersuchungen bestätigen ließ, konnte nicht gefunden werden. Der Grund mag in zu wenigen abgefragten perzeptiven Merkmalen liegen, die zudem allein von den Autoren bestimmt wurden. Um alle relevanten Beurteilungsaspekte erheben zu können, ließ Yoshida[11] durch 200 Personen Ausdrücke von einer Liste wählen, die ihnen zur Bewertung der Akustik in Räumen tauglich schienen. Er fand heraus, dass mehrere unabhängige Beurteilungskriterien existieren, die er allerdings nicht genau benennen konnte. Dies war nun Gegenstand der Untersuchungen von Hawkes und Douglas. Es war eine Untersuchung, bei der bereits psychometrische Forschungsmethoden zum Einsatz kamen. Die Versuchspersonen bewerteten während Konzertaufführungen anhand eines Fragebogens mit sechzehn Merkmalspaaren insgesamt vier Räume. Diese sechzehn Gegensatzpaare entstammten den Ausdrücken von Beranek. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass die sechzehn Attribute alle möglichen akustischen Wahrnehmungen wiedergeben.

Die hier erhobenen drei wichtigsten Beurteilungskriterien lauten Reverbance, Good Definition und Intimate. Yamagushi[12] deckte mit seinen Untersuchungen auf, dass die unterschiedliche Lautstärke an der Hörposition einen wichtigen Einfluss hat. Der nächste

---

[5] Hawkes, R. J. und Douglas, H.: „Subjective acoustic experience in concert auditoria“. In: *ACUSTICA* 24, (1971), S.235.
[6] Gottlob, D.: Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen. Diss. Göttingen: Universität, 1973.
[7] Siebrasse, K. G.: Vergleichende subjective Untersuchung zur Akustik von Konzertsälen. Diss. Göttingen: Universität, (1973).
[8] Parkin, P.H. und Scholes, W. E. und Derbyshire, A.C.: „The reverbation times of ten British concert halls“. In: *ACUSTICA* 2 (1952). S. 97.
[9] Sommerville, T.: “Subjective comparisons of concert Hall”. *BBC qurat.*8 (1953). S. 125..
[10] Kuhl, W.: „Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios“. In: *ACUSTICA* 4 (1954). S. 618.
[11] Yoshida, T.:“Psychometric approach to romm acoustics“. In: *5th ICA Liège, 1965.* B18.
[12] Yamagushi, K.: „Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics”. In: *J. Acout. Soc. Amer. 52 1972.* S.1271.

Schritt waren stereophon in Sälen aufgenommene und über Lautsprecher im reflektionsarmen Raum wiedergegebene Beispiele, bei denen der Beurteiler selbst zwischen paarweise dargebotenen Hörbeispielen hin- und herschalten konnte.

2.2. Die Untersuchungen von Wilkens und Lehmann

Wilkens und Lehmann benutzten für die Untersuchungen, Ende der 1970er Jahre, bereits ein selbst entwickeltes Kunstkopfmesssystem, mit dem sie Konzerte an verschiedenen Sitzplätzen in mehreren Sälen für jeweils eine Kopfposition (Blick nach vorn) aufzeichneten. Damit war es möglich, die Schalleigenschaften eines bestimmten Hörplatzes zu speichern und -ohne den Einfluss von nichtakustischen Einflüssen wie zum Beispiel dem optischen Raumeindruck[13]- im Hörversuch Raumeigenschaften bewerten zu lassen. Bei Voruntersuchungen zum Einfluss von zeitweise auftretenden Vorne-Hinten-Vertauschungen bei Kopfhörerwiedergabe auf die Bewertung der Räume kam ein spezielles Wiedergabeverfahren von Boerger und Kaps zum Einsatz. Die Ohrsignale wurden dabei den Kopfbewegungen entsprechend nachgeführt, indem man die Pegel und Laufzeiten anpasste. So konnte eine zweifelsfreie Vorn-Hinten-Ortung erreicht werden. Wurden die Ohrsignale vertauscht, führte dies zu einer Hinten-Ortung der vorher vorn georteten Signale. Nun wurden mit denselben Musikaufnahmen die Darbietungsformen Vorne und Hinten verglichen. Im Ergebnis konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden[14]. Bei der Hauptuntersuchung kam lediglich ein herkömmlicher Stereokopfhörer zu Einsatz, auf dem ein im Konzertsaal aufgenommenes Kunstkopfmusiksignal abgespielt wurde. In den zu untersuchenden sechs Sälen wurden die Aufnahmen eines Orchesters auf jeweils fünf Plätzen mit einem statischem Kunstkopfmikrofon angefertigt.

Bei den Hörtests erfolgte die Wiedergabe binaural (‚zweiohrig', zweikanalig) über Kopfhörer. Allerdings konnte bei diesem Verfahren die Wiedergabe der sich bei Kopfdrehung für beide Ohren ändernden Kopfübertragungsfunktion nicht realisiert werden. Außerdem spielte das

---

[13]Wilkens, H.: „Kopfbezügliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke". In: *ACUSTICA* 26 (1972), S. 213.

[14]Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien". In: *ACUSTICA* 45, (1980). S. 259.

Orchester zwar jeweils dieselben Stücke bei den Aufnahmen, eine gewisse Varianz in der Darbietung war jedoch nicht auszuschließen. [15]

Wegen des einfachen Aufbaus beim Hörversuch war es nun möglich, bis zu zehn Personen gleichzeitig zu testen, wobei jeder der vierzig Teilnehmer in drei anderthalb Stunden dauernden Sitzungen sechzig Musikbeispiele - aufgenommen in 6 Sälen - an je drei bis vier Plätzen zu bewerten hatte. Die Musikausschnitte wurden von Band abgespielt und hatten eine Länge zwischen 40s und 1min40s.

Die Teilnehmer des Versuchs waren Psychologiestudenten, Tonmeisterstudenten, Studenten und Mitarbeiter, des Instituts für Technische Akustik (ITA) und des Heinrich Hertz Instituts[16] Sie beantworteten einen Fragenbogen mit 19 Gegensatzpaaren. Die Merkmalspaare entstammten relevanter Literatur und dem Wortschatz von Musik und Akustikexperten. In diesem Zusammenhang wurde bemängelt, dass auch diese Merkmalsliste unvollständig sei.[17] Die Untersuchungen von Wilkens brachten 3 Beurteilungskriterien hervor: Stärke und Ausdehnung der Schallquelle, Deutlichkeit und Klarheit des Gesamtklangs, Gesamtklang bezüglich Klangfarbe.[18] Allerdings bezieht sich keins auf die subjektive Räumlichkeitswahrnehmung. Lehmann korrelierte die Daten der Untersuchungen von Wilkens zu den perzeptiven Beurteilungsaspekten in einer weiterführenden Studie mit physikalischen Maßen und zeigte verschiedene Zusammenhänge auf. Die Studien von Wilkens und Lehmann werden in der Literatur zum diesem Thema oft als die wichtigsten Arbeiten genannt.

---

[15] Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien“. In: *ACUSTICA* 45, (1980). S. 259.

[16] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen“. In: *ACUSTICA* 38 (1977). S.16

[17] Sotriropoulou, A.G. und Hawkes, R.J. und Fleming, D. B.: „Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:I, Multidimensional- Description of Evaluations”. In: *ACUSTICA* 81 (1995). S. 2.

[18] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen“. In: *ACUSTICA* 38 (1977). S 20.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann

Die beiden wichtigsten Arbeiten, auf die sich die Magisterarbeit stützt, stammen von Wilkens (1977) und Lehmann und Wilkens (1980). In beiden Arbeiten wurde mit den damals durchführbaren Methoden der Zusammenhang subjektiver raumakustischer Merkmale mit physikalisch messbaren akustischen Raumgrößen untersucht. Auf der perzeptiven Ebene spricht Wilkens von drei relevanten Beurteilungsaspekten:

-Empfindung der Stärke und Ausdehnung der Schallquelle
-Empfindung der Deutlichkeit des Gesamtklange
-Beurteilung des Gesamtklanges bezüglich der Klangfarbe.

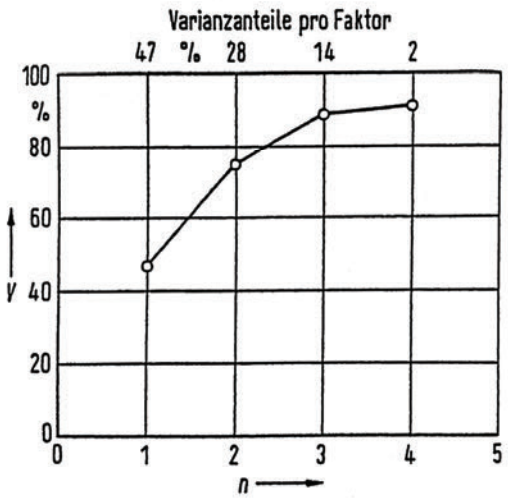


Fig. 2. Zunahme der aufgeklärten Urteilsvarianzen V in Abhängigkeit von der Anzahl n der extrahierten Faktoren. (Versuch mit 40 Versuchspersonen und 60 Beispielen.)

Abbildung 1 entnommen bei Wilkens (1977), S. 18, Fig 2

Die Faktorenanalyse von Wilkens zeigte, dass durch drei Faktoren 89% der Varianz erklärt werden und ein weiterer Faktor nur 2% mehr erklären würde. Die wichtigsten Attribute für die Empfindung der Stärke waren: klein–groß, kräftig–gedämpft, schwach–stark, laut–leise. Für die Empfindung der Deutlichkeit waren es: deutlich-undeutlich, diffus–konzentriert, verschwommen–klar. Weich–hart, hell–dunkel, rund-spitz, höhenbetont–nicht höhenbetont kristallisieren sich als Attribute für die Beurteilung des Klanges bezüglich Klangfarbe heraus.[19]

[19] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen“. In: *ACUSTICA* 38 (1977), S.20.

Faktor	*Attribute*
Stärke	*klein-groß*
	kräftig-gedämpft
	schwach-stark
	laut-leise
Deutlichkeit	*deutlich-undeutlich*
	diffus-konzentriert
	verschwommen-klar
Beurteilung des Klangs bezgl. Klangfarbe	*weich-hart*
	hell-dunkel
	rund-spitz
	höhenbetont-nicht höhenbetont

Tabelle 1 Die wichtigste Attribute für die drei perzeptiven Faktoren bei Wilkens

Sind Merkmal Deutlichkeit und Klarheit hoch ausgeprägt, spricht dies für eine gute Akustik. Die Stärke und Ausdehnung der Schallquelle hatte für die Versuchspersonen eine unterschiedliche Bedeutung. Eine Versuchsgruppe beurteilte eine akustische Situation als gut, wenn die Situation als groß empfunden wird, die andere, wenn das Schallfeld als nicht so kräftig empfunden wurde. Wilkens zeigte auf, dass in künftigen Untersuchungen der Einfluss der Senderlautstärke nicht außer Acht gelassen werden darf.

Er stellte fest, dass das Gegensatzpaar trocken-hallig nur gering mit den Güteurteilen korreliert ist, was auch nicht zu erwarten war, da die für die Beurteilung der Güte wichtigen Faktoren die Empfindung der Stärke und die Empfindung der Deutlichkeit sind. Diese Faktoren werden zwar durch die Nachhallzeit beeinflusst, allerdings in unterschiedlicher Weise. Wird das statistische Nachhallfeld in einem Raum stärker, so wird die empfundene Stärke größer, gleichzeitig besteht aber die Gefahr einer meist abnehmenden Deutlichkeit. Dies bestätigte sich auch in der Untersuchung von Lehmann.[20] Hier korrelierte die Deutlichkeit negativ sehr stark mit der Nachhallzeit und der Early Decay Time. Die Diffusität korreliert am höchsten und positiv mit der Early Decay Time und der Nachhallzeit.

[20]Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien“. In: *ACUSTICA* 45, (1980). S 267.

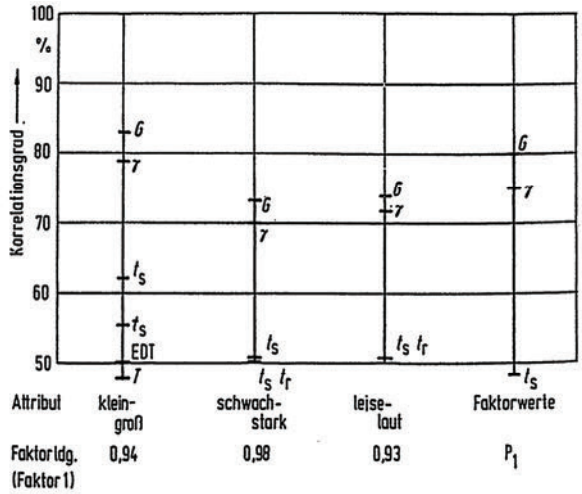


Fig. 2. Korrelation raumakustischer Kriterien mit Attributen und Faktorwerten der „Stärke".

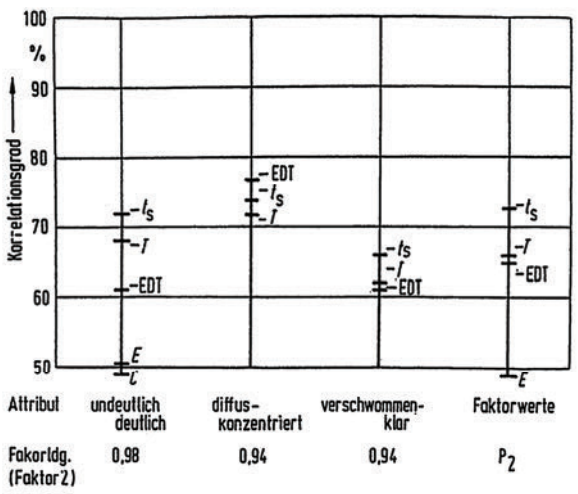


Fig. 4. Korrelationen raumakustischer Kriterien mit Attributen und Faktorwerten der „Deutlichkeit".

Abbildung 2 Korrelation raumakustischer Kriterien mit Attributen und Faktorwerten bei Lehmann(1980), S. 262, Fig 2 und S. 264, Fig 4

Wilkens kommt zwar zu drei Beurteilungsaspekten, schließt aber nicht aus, dass noch weitere Aspekte eine Rolle spielen könnten, hält es jedoch nicht für besonders wahrscheinlich. Bei einer Untersuchung zur Güte von Lautsprechern aus dem Jahr 1978 kommt er zu ähnlichen Beurteilungsaspekten. Diese sind Volumen, Deutlichkeit Schärfe.[21]

Wilkens betont, dass bei der Beurteilung der Akustik der Binauraldatensätze die Varianz der Wahrnehmung zwischen Messpositionen innerhalb eines Saales oft größer war als auf gleichen Messpositionen unterschiedlicher Säle.[22] Auch dies gilt es, im Rahmen dieser Untersuchung nachzuprüfen. Er stellte in seiner Arbeit fest, dass die größte Varianz der Wahrnehmung der Hörtestteilnehmer durch die Perzeption der unterschiedlichen Säle hervorgerufen wurde. Die besonders hoch korrelierten Gegensatzpaare waren dabei klein–groß, schwach–stark, kräftig–gedämpft, laut–leise, tiefenbetont–nicht tiefenbetont und hell–dunkel. In den Gegensatzpaaren deutlich–undeutlich und verschwommen–klar stach die wesentliche Varianz in der Wahrnehmung der Probanden auf den verschiedenen Plätzen hervor. Beim Einfluß der Musikausschnitte traten die größten Varianzen in den Urteilen zu den Merkmalen Weichheit, Brillanz, Stumpfheit, Aufdringlichkeit, Höhenbetontheit auf. Allerdings waren auch in allen anderen Gegensatzpaaren signifikante Varianzen vorhanden. Daraus leitete Wilkens ab, dass die Empfindung der Deutlichkeit eher durch die

---

[21] Wilkens, H. und Bünning, H.: „Vergleich der subjektiveb Beurteilung von Lautsprechern aus Paarvergleichen und Einzelbeurteilungen. In: *DAGA Bochun 1978,* Berichtsheft VDE Verlag. Berlin. S. 587.

[22] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen". In: *ACUSTICA* 38 (1977), S.22.

Platzunterschiede und die Empfindung der Stärke durch die Saalunterschiede beeinflusst werden.[23]

Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse. Ergebnisse, die nicht mit 95% signifikant sind, sind nicht eingetragen, Ergebnisse, die größer 99% signifikant sind, sind kursiv eingetragen.

Gegensatzpaar		Einflußvariable			Kombinationen der Einflußvariablen			
		Platz	Saal	Musik	Platz/ Saal	Platz/ Musik	Saal/ Musik	Platz/ Saal/ Musik
1	groß	18,57	*57,37*	4,00	*3,55*	2,07	1,90	—
2	angenehm	—	—	—	*8,21*	—	2,18	1,93
3	undeutlich	*22,58*	*7,57*	4,53	*5,80*	—	—	—
4	weich	—	*12,13*	*58,97*	*3,72*	—	—	—
5	brillant	—	*17,14*	*23,71*	*7,83*	—	—	—
6	rund	—	*12,91*	*64,94*	3,33	—	*3,15*	—
7	kräftig	—	*56,24*	*18,25*	*5,81*	5.39	—	—
8	gefällt	—	6.15	—	*9.65*	—	3,15	—
9	stumpf	—	*20,46*	*21,97*	*5,59*	—	—	—
10	diffus	—	*12,50*	—	*5.57*	—	2,53	2.37
11	aufdringlich	15,65	*30.52*	*45,82*	*3,19*	—	*2,95*	—
12	hell	—	*18.27*	6,35	*4,27*	—	—	*2,09*
13	verschwommen	12,70	*10,88*	6.44	*6,13*	—	—	—
14	trocken	—	*53.64*	6,71	2,89	—	—	—
15	schwach	—	*37,51*	*22,61*	*6,22*	—	1,78	—
16	höhenbetont	—	*9,59*	*19,74*	*4,35*	—	2,74	—
17	tiefenbetont	—	*26,43*	—	*3.49*	—	—	1,96
18	schön	—	—	—	*5,94*	—	2,62	—
19	leise	*14,07*	*36,59*	*19,46*	3,41	2,74	*1,91*	—

Tabelle 2 Ergebnisse der mehrfaktoriellen Varianzanalyse von Wilkens(1977), S. 21, Tabelle 4

Es wurde gefordert, dass sich folgende Untersuchungen mit der Findung von physikalischen Parametern beschäftigen sollten, welche die Beurteilungsaspekte auszudrücken vermögen. Dies würde nicht so einfach sein, da der Einfluss der Musikausschnitte auch nicht vernachlässigbar wäre und es so schwierig würde, „einen charakteristischen Wert für die subjektive Einstufung eines jeden Platzes zu finden“[24].

Die raumakustischen physikalischen Parameter bestimmte Lehmann aus den monauralen Raumimpulsantworten der Säle. Er bestimmte die monauralen (einkanalig) Raumimpulsantworten in den Sälen wie folgt: per Funkenknall nacheinander an neun verschiedenen Positionen im Bereich der Bühnenmitte wurde der Saal akustisch angeregt um dann an den Messpositionen der Kunstkopfaufnahmen im Saal die Impulsantworten mit einem omnidirektionalen Messmikrofon aufzuzeichnen. Anschließend bildete er Mittelwerte

[23]Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen“. In: *ACUSTICA* 38 (1977), S.22.
[24]Vgl. ebenda S.22.

für die physikalischen Maße über die verschiedenen Sendeorte. Bei Korrelation der physikalischen Maße untereinander wurden folgende Zusammenhänge gefunden. Hohe Korrelation der Nachhallmaße EDT, Anfangsnachhallzeit und Nachhallzeit. Es korrelieren weiterhin hoch miteinander Deutlichkeitsgrad, Hallmaß und Klarheitsmaß C.

	T	EDT	TI	TA	t_S	t_r	D	R	E	C	ϵ	L	H	G
T		76	90	95	87	54	-52	51	-59	55				54
EDT	76		96	92	76									
TI	90	96		99	83									
TA	95	92	99		86									
t_S	87	76	83	86		82	-70	66	-79	-78				66
t_r	54				82		-91	87	-95	-95	64			55
D	-52				-70	-91		-99	97	95	-80		50	
R	51				66	87	-99		-96	-94	83			
E	-59				-79	-95	97	-96	99	99	-76			-53
C	-55				-78	-95	95	94	99		-74			
ϵ						64	-80	83	76	-74				
L													-88	
H							50					-88		
G	50				62	52			-51					

Tabelle 3 Korrelationen der physikalischen Maße untereinander bei Lehmann Abbildung aus Lehmann(1980) S. 262, Tabelle 4

Zwischen diesen beiden Korrelationsgruppen fanden sich die Risetime und Schwerpunktzeit, die untereinander stark korrelierten. Nach Korrelation mit raumakustischen Maße stellte Lehmann fest, dass die Stärke und Ausdehnung durch das Stärkemaß und die Nachhallzeit[25], die Deutlichkeit durch die Schwerpunktzeit(die Korrelation war umgekehrt) und die Klangfarbe durch die Neigung des Frequenzganges der Nachhallzeit oder der Early-Decay-Time[26] beschrieben werden konnte. [27]

Soll es zu einer guten Beurteilung der Hörsamkeit der Hörplätze kommen, sollte eine Schwerpunktzeit von rund 140ms nicht überschritten und ein Stärkemaß von -28 dB nicht unterschritten werden.

---

[25] Korrelationsgrad Stärkemaß mit dem Faktorwert 80%, Nachhallzeit 75%

[26] Die Korrelationen liegen für diesen Faktorwert alle unter 50%

[27] Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien“. In: *ACUSTICA* 45, (1980). S 262.

Wilkens merkte an, dass die Lautstärke am Empfangsort nicht die einzige physikalische Größe ist, welche die Empfindung der Stäke ausmacht, sondern dass diese wohl auch durch die scheinbare Ausdehnung der Schallquelle sowie das empfundene Volumen derselben bestimmt wird.

Das Stärkemaß ist eine raumakustische Größe, die von Lehmann im Rahmen seiner Untersuchungen entwickelt wurde, da bisher bekannte Maße die Beurteilung des Stärkeaspekts nicht ausreichend beschreiben. Im Kapitel 5 werden das Stärkemaß sowie die anderen physikalischen Maße, die in der Magisterarbeit Anwendung finden, noch näher beschrieben. Bedingt durch die zu unterschiedlichen Stimuli, die bei den Hörversuchen genutzt wurden und unterschiedlich beurteilende Versuchspersonengruppen formulierte Lehmann kein Optimum von raumakustischen Eigenschaften.

Methodische Defizite der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann aus heutiger Sicht und Konkretisierung der Forschungsfrage für diese Magisterarbeit

In dieser Arbeit sollen, basierend auf den Untersuchungen von Wilkens und Lehmann, Zusammenhänge zwischen der subjektiven Wahrnehmung von Räumen und physikalisch messbaren Parametern dieser Räume untersucht werden. Die hier vorgestellte Untersuchung wird Teile der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann nachempfinden, allerdings mit den modernen technischen Möglichkeiten der automatisierten BRIR-Datensatz-Akquise (BRIR - binaurale Raumimpulsantwort) und der Raumsimulation durch dynamische Binauralsynthese.

Bei Wilkens' und Lehmanns Untersuchungen treten aus heutiger Sicht zahlreiche Probleme zu Tage, die mit den damals zur Verfügung stehenden Methoden nicht umgangen werden konnten. So wurden die Säle beim Hörversuch und bei der Messung der monauralen Impulsantworten für die Gewinnung der physikalischen Maße in unterschiedlicher Weise akustisch angeregt. Zum einen mit Orchester zur Aufnahme der Stimuli für die Durchführung der Hörversuche zur Gewinnung perzeptiver Daten und zum anderen mit Funkenknall zur Bestimmung von physikalischen Maßen aus den gemessenen Raumimpulsantworten (IR). Heutzutage bieten computergestützte akustische FFT- Messsysteme wie EASERA oder der

am Fachgebiet für Audiokommunikation der Technischen Universität Berlin entwickelte Messroboter FABIAN, (Fast And Binaural Impulseresponse AqusitioN), und die dynamische Binauralsynthese die Möglichkeit raumakustische Umgebungen zu auralisieren, und so die Akustik von Räumen in Hörversuchen in-situ und quasi im A / B Vergleich bewerten zu lassen.[28]FABIAN wurde zur Messung und Erzeugung von BRIR Datensätzen genutzt.

Außerdem wurden die Musikstücke in jedem Saal erneut eingespielt. Da dies durch ein professionelles Orchester geschah, sollte man zwar von einer großen Ähnlichkeit der gespielten Stücke (Stimuli) ausgehen, es konnten aber nie exakt dieselben sein. Mit Hilfe der dynamischen Binauralsynthese ist es heute allerdings möglich, immer dieselben Stimuli in unterschiedlichen akustischen Umgebungen bewerten zu lassen.

Bei Wilkens Versuchen wurden die Ohrsignale bei der Bewertung der Räume nicht den Kopfbewegungen entsprechend nachgeführt, das Schallfeld wanderte also mit. Blauert allerdings beschrieb in seinem Buch über das räumliche Hören Drehtheorien, nach denen Kopfbewegungen bewusster und unbewusster Art bei der Einschätzung der Räumlichkeit von Hörereignissen eine wichtige Rolle spielen[29]. Die Möglichkeiten, die das System FABIAN und die dynamische Binauralsynthese bieten, berücksichtigen diese Tatsache. Vor diesem Hintergrund sind die Aussagen in Wilkens' Versuchen über räumliche Wahrnehmungen zu hinterfragen. Vielleicht ist das Ausschalten dieser für das räumliche Hören wichtigen Rahmenbedingung der Grund, warum bei Wilkens keiner der drei Beurteilungsaspekte in direkter Weise auf die Wahrnehmung von Räumlichkeit abzielt. Dies ist ebenfalls Gegenstand dieser Magisterarbeit.

In den Hörtests wurden die Räume den Pobanden mittels dynamischer Binauralsynthese über einen Kopfhörer präsentiert. Die Kopfposition der Versuchsperson wurde über einen am Kopfhörer befindlichen Headtracker abgetastet. Ein leistungsfähiges Computersystem machte die Bereitstellung der binauralen Raumimpulsantworten von mehreren Räumen gleichzeitig möglich. Diese wurden den Kopfpositionen entsprechend dynamisch nachgeführt.

---

[28]Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S 8

[29]Blauert, Jens.: *Räumliches Hören.* Suttgart: Hirzel Verlag. 1974. S 143 / 144

Ein weiteres Manko, trat bei der näheren Betrachtung der Untersuchungen von Wilkens zu Tage. Der Fragebogen mit den Gegensatzpaaren wurde durch Wilkens vorgegeben. Er prüfte zwar in Voruntersuchungen die Gegensatzpaare auf ihre Vollständigkeit, allerdings ist nicht sicher, ob bei diesem Verfahren nicht wichtige perzeptive Eigenschaften übergangen wurden.[30] In der hier vorgestellten Studie wird auch auf übliche psychologische Forschungmethoden zurückgegriffen, die in der Psychoakustik noch nicht lange ihre Anwendung finden. So wurde bei der Untersuchung für das Auffinden von Gegensatzpaaren zur Erstellung des Fragebogens für das Semantische Differenzial zur Bewertung der Säle, im Gegensatz zu Wilkens' und Lehmanns Methode, die Repertory Grid- Technik genutzt. Der große Vorteil dieses von George A. Kelly entwickelten und in seinem 1955 erschienenen Buch vorgestellten[31] Verfahrens ist, dass den Versuchspersonen keine Konstrukte von Gegensatzpaaren vorgegeben werden, sondern die Versuchspersonen ihrer Wahrnehmung entsprechend selbst Konstrukte entwerfen, die dann über ein Semantisches Differenzial bewertet werden können.[32] Die Ergebnisse werden dann mit den Ergebnissen der monaural gemessenen Raumimpulsantworten korreliert.

2.3. Die Untersuchungen der letzten zwanzig Jahre

Barron führte, um „reale Akustik von Sälen zu evaluieren", Ende der achtziger Jahr wieder Befragungen in Konzertsälen durch, bei denen Expertenhörer Fragebögen bewerteten, die repräsentative subjektive Faktoren abfragten, welche in früheren Studien ermittelt worden waren. Bei der Korrelation dieser Ergebnisse mit physikalischen Maßen deckte er auf, dass die Merkmale, Halligkeit und Klarheit (negative Korrelation) stark mit der Nachhallzeit korrelieren. Gleiches gilt auch für den akustischen Gesamteindruck.[33]

1993 veröffentlichten Sotiropoulou und Hawkes eine Studie, bei der Konzertbesucher während der Konzerte Fragebögen mit bipolaren semantischen Beurteilungsskalen

---

[30]Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen". In: *ACUSTICA* 38 (1977), S. 16, 17.

[31]Kelly George A.: *Die Psychologie der persönlichen Konstrukte.* Neuauflage Paderborn: Junfermann- Verlag, 1986.

[32]Scheer, Jörn W.: „Psychologie der persönlichen Konstrukte und Pepertory Grid-Technik". In: Schmidt. L.R. (Hg.). *Psychologische Aspekte medizinischer Maßnahmen. Jahrbuch der Psychologie.* Band 7.Heidelberg, Berlin: Spinger, 1992. S 273, 274

[33]Sotriropoulou, A.G, Fleming, D. B.: "Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:II, Physical Room Acoustic Criteria Subjectively Significant". In: *ACUSTICA* 81 (1995).S 12

beantworten sollten. Die Bögen wurden vorher experimentell auf ihre Tauglichkeit geprüft. Nach einer Faktorenanalyse konnten vier Faktoren extrahiert werden Volumen, Klarheit, Tonqualität und Nähe. Dies bestätigt die Ergebnisse von Wilkens und Lehmann.[34]

Bei Fleming und Sotiropoulou wurden die Ergebnisse von Hawkes mit physikalischen Maßen korreliert. Dabei war der Zusammenhang von Volumen mit dem Klarheitsmaß C_{80}, Nähe mit dem Gesamtpegel und dem Abstand des Empfängers zur Schallquelle und die Tonqualität mit einem frühen Abfall der Nachhallzeit hoch. Die subjektiv wahrgenommene Klarheit korrelierte nicht mit den physikalischen Klarheitsmaßen. Die Anzahl der verwandten physikalischen Maße war klein. Verschiedene frequenzabhängige EDT Maße (frühe Nachhallzeit), verschiedene frequenzabhängige Pegelmaße und Klarheitsmaße kamen zur Anwendung.[35] Diese Auswahl hätte durchaus umfangreicher gestaltet werden können.

In den letzten zehn Jahren wurden von Berg und Rumsey interessante Studien durchgeführt, welche die Bewertung von künstlichen Schallfeldern als Gegenstand hatten, bei denen sie zum Auffinden von perzeptiven Merkmalen die in den Psychologie schon lange angewandte Repertory Grid Technik benutzten[36]. Dieses psychometrische Verfahren wird im Kapitel 6 noch genauer erläutert.

2.4. Entwicklungen im Bereich der Binauralmesstechnik im Laufe der Zeit bis heute

Zur Messung der binauralen Raumimpulsantworten der Säle, im Rahmen dieser Magisterarbeit, kam, FABIAN, ein computergesteuertes Binaural Mess- und Wiedergabesystem zum Einsatz. FABIAN wird in Kapitel 3.5. erläutert. In diesem Kapitel wird nun kurz die Evolution der Kunstkopfmesssysteme beschrieben.

---

[34]Sotriropoulou, A.G. und Hawkes, R.J. und Fleming, D. B.: „Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:I, Multidimensional- Description of Evaluations". In: *ACUSTICA* 81 (1995). S. 1.

[35]Sotriropoulou, A.G, Fleming, D. B.: "Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:II, Physical Room Acoustic Criteria Subjectively Significant". In: *ACUSTICA* 81 (1995).S 13.

[36]Berg Berg, Rumsey: "Verification and correlation of attributes used for describing the spatial quality of reproduced sound". In: *19th AES international Conference 2001.* S. 1.

Ein Kunstkopf ist die Nachbildung eines menschlichen Kopfes, bei dem in jedem Ohrkanal jeweils ein Mikrofon eingebaut ist.[37] Mit einem solchen Kunstkopfmikrofon kann man sowohl direkt Signale (Musik, Sprache, Geräusche) aufzeichnen oder aber auch binaurale HRTFs (Head related Transfer Funktions). In einer binauralen Raumimpulsantwort sind folgende Informationen enthalten: die Raumimpulsantwort für jedes Ohr, die Außenohrübertragungsfunktion, die HRTF. Wenn der Torso und der Hals nachgebildet sind, werden akustische Effekte wie Beugung, Abschattung, Reflektion und andere akustische Effekte, die durch den Torso hervorgerufen werden, in den Aufnahmen berücksichtigt. Bei binauralen Kunstkopfaufnahmen wird der Schalldruck aufgenommen, der am Eingang des Ohrkanals wirkt. In der binauralen Raumimpulsantwort sind nahezu alle perzeptiven Informationen des Raums, den es zu bewerten gilt, vorhanden. Sie sind in den an den beiden Trommelfellen anliegenden Schalldrucksignalen enthalten.[38] Die Wichtigkeit des nachgebildeten Körpers für Plausibilität von binauralen Aufnahmen wurde durch Untersuchungen von Minnaar et al. bestätigt. [39]

Übertragungsverfahren mit Nachbildungen menschlicher Köpfe wurden bereits 1886 in den Bell Laboratories erforscht. 1939 bauten Boer & Vermeulen[40] Mikrofone in die rudimentären Ohren einer Schaufensterpuppe mit Korpus ein. Erste ernstzunehmende Kunstkopfmesssysteme wurden von Kürer et al. 1969 und Damaske & Wagener ebenfalls im Jahre 1969 entwickelt und zu Untersuchungen der subjektiven Bewertung der Hörsamkeit von Konzertsälen genutzt.[41]

1972 baute Wilkens einen Kunstkopf aus Gips ohne Korpus. Als Vorlage dienten natürliche Ohr- und Gesichtabgüsse[42]. Die Ohrnachbildungen waren aus Kautschuk gefertigt. Es wurden zwei Mikrofone vom Hersteller NEUMANN vom Typ KM83 mit 21mm Kapseldurchmesser genutzt. Diese Mikrofone mussten kompliziert auf den Querschnitt des Ohrkanals angepasst

---

[37]Weinzierl, Stefan: „Aufnahmeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 588,589.

[38]Møller, H.:“Fundamentals of binaural technology“, *Applied Acoustics*. 36, No. ¾. 1992. S. 171-218.

[39]Weinzierl, Stefan,: „Aufnahmeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 586.

[40]Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S 27.

[41]Weinzierl, Stefan: „Aufnahmeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 588-589.

[42]Wilkens, H.: „Kopfbezügliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke“. In: *ACUSTICA* 26 (1972), S.214

werden, dies wurde durch die Einfügung einer Impedanz in Form eines Strömungswiderstandes realisiert.[43] Der Kunstkopf von Wilkens kam bei den bereits vorgestellten Untersuchungen von ihm aus dem Jahr 1977 zur Wahrnehmung der Akustik von Konzertsälen bei der Aufnahme der Musikausschnitte in den Sälen zum Einsatz.

Später wurden auch von anderen Firmen Kunstkopfmesssysteme hergestellt. BRÜEL & KJAER baute ein Kunstkopfmikrofon mit stilisiertem Kopf und Torso. HEAD ACOUSTICS entwickelten einen Kunstkopf anhand von mathematischen Modellen. Die Firmen KEMAR und CORTEX bauten äußerlich fast originalgetreue Nachbildungen eines Menschen. KEMAR bot sogar verschiedene Ohrmodelle für ihren Kunstkopf an: europäische, amerikanische, weibliche, männliche und andere.[44]

Systeme aus jüngster Zeit sind bereits mit Motoren (Halsgelenk) im Hals ausgestattet; so zum Beispiel das von Moldrzyk et al. 2002 entwickelte Kunstkopfsystem. Dieser Kunstkopf hat einen Torso mit nachgebildeten Armen. Der Kopf und der Torso wurden nach Kopf- und Körperabdrücken von Herrn Moldrzyk gestaltet. Der Kopf des Kunstkopfdummys konnte bereits automatisiert über ein Halsgelenk horizontal gedreht werden[45]. Mit ihm war es möglich binaurale Raumimpulsantworten zu messen, die bei der Wiedergabe durch Faltung mit nachhallfrei aufgenommenem Tonmaterial einen äußert realistischen Höreindruck bei den Versuchsteilnehmern erzeugten. Die Wiedergabe erfolgte headtrackergesteuert via Kopfhörer. Bei diesem System wurden Kopfdrehungen des Probanden berücksichtigt, allerdings nur auf der horizontalen Ebene.

Lindau entwickelte im Jahre 2006 das horizontal und vertikal per Halsgelenk schwenkbare Mess- und Wiedergabesystem FABIAN. Dieses System ist über mehrere Freiheitsgrade lokal beweglich: horizontal, vertikal und lateral. Es wird in einem der folgenden Kapitel noch genauer beschrieben, da es bei den Messungen im Rahmen dieser Magisterarbeit zum Einsatz kam.

---

[43] Wilkens, H.: „Kopfbezügliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke“. In: *ACUSTICA* 26 (1972) S.215

[44] Weinzierl, Stefan: „Aufnahmeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 587.

[45] Moldrzyk, Christoph ;Ahnert, W.; Feistel, S. und Lentz, T. und Weinzierl, S.: “Head-Tracked Auralization of Acoustical Simulation” . In: *117th AES Convention, San Francisco, 2004.* Preprint. S. 2-5.

Die beiden letztgenannten Systeme arbeiten bei der Wiedergabe mit dynamischer Binauralsynthese. Durch FABIAN ist es möglich, im kompletten Hörbereich (Bewegungsbereich des menschlichen Kopfes) des Menschen binaurale Raumimpulsantworten zu messen und wiederzugeben. FABIAN bietet die Möglichkeit zur realistischsten Abbildung einer natürlichen Hörumgebung aller hier vorgestellten Systeme.

Um eine nahezu originalgetreue Nachbildung der realen Hörumgebung zu erreichen, wurden die binauralen Raumimpulsantworten entzerrt. Vor der Messung wurde eine Kompensation des Messsystems durchgeführt. Beim Postprocessing erfolgte eine Mikrofonentzerrung und eine Kopfhörerentzerrung der BRIR-Datensätze. Eine Kompensation des Lautsprecherfrequenzgangs fand nicht statt.

3. Die Methoden Zur Messung der Raumimpulsantworten

3.1. Vorstellung der im Rahmen der Arbeit gemessenen Räume und der Kriterien die zu ihrer Auswahl führten

Die im Methodenteil noch näher zu beschreibende Repertory Grid Technik ist eine Forschungsmethode, die vor allem in der Psychologie Anwendung findet und erst seit kurzem auch in der psychoakustischen Forschung genutzt wird. Die Repertory Grid Technik wird bei der vorliegenden Arbeit zur Erstellung eines allgemein gültigen Fragebogens zur perzeptiven Bewertung der Akustik von Räumen durch Hörer angewandt. Um möglichst viele verschiedene Beurteilungsaspekte berücksichtigende Gegensatzpaare für den Fragebogen zu erzeugen, ist es wichtig, möglichst verschiedene, in ihren physikalischen und akustischen Eigenschaften variante Räume durch die Versuchspersonen bewerten zu lassen. Dieser Forderung wird durch die getroffene Auswahl der Räume Rechnung getragen. Die Räume sind sowohl in ihren Volumina, ihren Abmessungen als auch in ihren akustischen Maßen wie Nachhallzeit oder Sprachverständlichkeitsindex, um nur einige zu nennen, variant. Auch in ihrer Nutzung sind die Räume sehr unterschiedlich. Es wurden ein Tonstudio, ein Kammersaal, ein Sprechtheater, ein Revuetheater und ein Vorlesungssaal als Räume für die Untersuchung genutzt. Die Räume sollen nun näher vorgestellt werden.

Der große Saal im Friedrichstadtpalast

Der heutige Friedrichstadtpalast wurde als Neubau im Jahre 1984 an der Friedrichstraße 107 in Berlin eröffnet.[46] Er verfügt über einen großen Saal mit 1.895 Plätzen und eine über 2.800m² messende Theaterbühne. Diese Bühne gilt als die größte Theaterbühne der Welt. Der Friedrichstadtpalast ist das größte Revuetheater Europas.[47] Vor allem Revuen mit aufwendigen Ballet-, Akrobatik-, Artistik- und Gesangsnummern werden in diesem Haus aufgeführt. Die Beschallung im Theater erfolgt über umfangreiche Elektroakustik.

Trotz des großen Raumvolumens von 15.600m³ konnte durch bauakustische Maßnahmen eine mittlere Nachhallzeit[48] von T=1,7s erreicht werden.[49] Die Rückwände des Saals sind schallabsorbierend genau wie auch die stark gepolsterten Zuschauersessel. Bei Sälen für Musikdarbietungen sollte die Nachhallzeit in Abhängigkeit zum Raumvolumen in einem Bereich von 1,6s bis 2s liegen. Dieses Kriterium erfüllt der Friedrichstadtpalast.[50]

Die Reihen im Zuschauerbereich sind ansteigend überhöht, und der Saal hat eine komplexe Grundform mit gerundeter Rückwand. Mit einer Volumenkennzahl von 8,3 [m³/ Platz] liegt der Saal in einem für Musiktheater und Konzertsäle üblichen Bereich.[51]

Abbildung 3 180° Blick auf die Bühne von Messposition 1 im Friedrichstadtpalast

---

[46]Schmidt, Bernd: *Programm zu "Sommer-Revue"*, Berlin: Friedrichstadtpalast, 2008. S. 1,2.
[47]*Informationen zum Friedrichstadtpalast.*
[48]Die in diesem Kapitel genannten Werte von Nachhallzeit und Volumenkennzahl dienen nicht zur Bewertung der Güte der Räume, sondern nur zur Charakterisierung der Räume als typische Beispiele Ihrer Art.
[49]Gutachten der Firma BBM zur *Raumakustik des Friedrichstadtpalast*. Berlin: 2005.
[50]Webers, Johannes: *Handbuch de Tonstudiotechnik.* : 8.Auflage. Poing: Franzis'Verlag, 2003. S. 87.
[51]Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik". In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 209.

Abbildung 4 180° Blick auf die Bühne von Messposition 2 im Friedrichstadtpalast

Das Audimax H105 an der TU- Berlin

Das Auditorium Maximum (Audimax), Raum H105, der Technischen Universität Berlin wurde 1965 im Rahmen des Hauptgebäudeneubaus als Anbau vorgelagert. Der Raum wird als Hörsaal für große Vorlesungen im Grundstudium im Universitätsbetrieb oder für Großveranstaltungen genutzt. Er bietet im Parkett 888 Sitzplätze und 304 Plätze im Oberrang, diese sind aus Holz und nur leicht gepolstert.[52] Die Sitzreihen sind zur Raumrückwand hin überhöht.

Abbildung 5 180° Blick von Messplatz 1 mit Bühnenblick im Audimax

[52] *Informationen zum Audimax der Technischen Universität Berlin.*

Abbildung 6 180° Blick von Messplatz 2 mit Bühnenblick im Audimax

Das Raumvolumen betrug 8.605 m³. Damit liegt die Volumenkennzahl bei 7,22 [m³/Platz]. Für Hörsäle und Sprechdarbietung gilt eine Volumenkennzahl von 3 bis 6 als normal³. Der Wert im Audimax ist als ungünstig einzuschätzen.[53] Die mittlere Nachhallzeit beträgt 2s und wurde aus der im Versuch gemessenen monauralen Raumimpulsantwort bestimmt.

Für die Messung der Impulsantworten wurde nur der Parkettbereich genutzt. Die Nachhallzeit liegt damit in einem Bereich, der für Kirchen normal wäre, für einen Vorlesungssaal ist sie aber zu lang. Optimal wäre ein Wert zwischen 0,7s und 1,2s.[54]

Um eine bessere Verständlichkeit im ganzen Saal zu erreichen, kommt fest installierte Elektroakustik zum Einsatz. Die Grundform des Raums ist trapezförmig; er öffnet sich zum Publikum hin. Die Abmessungen betragen: Länge 29,9m Breite 24,6m und Höhe 11,7m.

Das Wiener Burgtheater

Das Burgtheater in Wien gilt als eine der bedeutendsten Bühnen Europas und ist das zweitälteste europäische, sowie das größte deutschsprachige Sprechtheater. [55] Es wurde 1888 eröffnet und nach einem Brand 1945 und anschließendem Wiederaufbau im Jahr 1955 wiedereröffnet. Nach dem Abschluss von Modernisierungsarbeiten an der Bühne im Jahr 2004 ist das Wiener Burgtheater nicht nur aufgrund seines vorhandenen künstlerischen Ranges, sondern auch von der technischen Ausrüstung her ein international bedeutendes

---

[53] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik*. : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 209.

[54] Dickreiter, Michael: *Handbuch der Audiotechnik.* 6. Auflage München: Saur Verlag, 1997. S. 35.

[55] Kaufmann-Fressner: *Das Burgtheater.* Wien: Folio Verlag. 2005. S. 74.

Schauspielhaus.[56] Im Saal haben ca. 1.340 Zuschauer Platz davon sind 1.175 Sitzplätze und der Rest Stehplätze.[57]

Abbildung 7 180° Blick von Messplatz 1 und Messplatz 2 im im Burgtheater

Der Saal hat einen Zuschauersitzbereich im Parkett vor der Bühne. An den Seiten befinden sich in mehreren Etagen Logen und Ränge. Die Rückwand ist mit Samtverkleidung ausgeführt.

Stehplätze befinden sich jeweils im hinteren Teil der Ränge und in der gesamten oberen Etage. Die Sitze im Saal, im Rang und in den Logen sind stark gepolstert und schall-absorbierend, die Ränge und die Sitzreihen im Parkett sind überhöht. Der Raum hat eine halbrunde Grundform und öffnet sich zur Bühne hin. Das Bühnenportal ist 12 m breit[58], wobei das Saalvolumen 7.780m³ beträgt.

Das Burgtheater wurde als Sprechtheater konzipiert und kommt daher weitgehend ohne Elektroakustik aus. Nach Angaben eines der Tonmeister wird das Burgtheater bei zwei Drittel der dort stattfindenden Veranstaltungen unverstärkt bespielt. Mit einer Volumenkennzahl, die 5.81[m³/Platz] beträgt und einer Nachhallzeit von 1,1s liegt es im für Sprechtheater als günstig geltenden Bereich.[59] [60]

---

[56] *Informationen zum Burgtheater.*
[57] Dermutz, Klaus: *Das Burgtheater 1955-2005.* Wien: Zsolnay Verlag. 2005. S. 195.
[58] *Technische Daten zum Burgtheater.*
[59] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik". In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 209.
[60] Dickreiter, Michael: *Handbuch der Audiotechnik.* 6. Auflage München: Saur Verlag, 1997. S. 35.

Der Kammersaal der Universität der Künste Berlin

Der Kammersaal befindet sich in den Gebäuden der Universität der Künste in Berlin. Der Saal bietet maximal 99 Personen Platz und ist mit normalen Stühlen ausgestattet, was die Möglichkeit einer sehr variablen Bestuhlung und Nutzung bietet. Die Universität der Künste nutzt den Raum hauptsächlich für Kammermusik, Vortragsabende, Lesungen, Pressegespräche und Empfänge. [61]

Abbildung 8 Kammersaal UdK, Bühnenblick von Messposition 1 und 2 im 180° Blick

Im Rahmen der Raumimpulsantwortmessungen war der Saal mit 60 nur leicht gepolsterten Holzstühlen bestückt, die sich in der hinteren Hälfte des Raums befanden. Der Rest der Stühle war vor der Rückwand gestapelt. Der Boden ist eben und mit Holzparkett ausgelegt, in der linken Seitenwand sind drei große Fenster eingelassen, die Rückwand ist mit verstellbaren Diffuserelementen bestückt. Der Saal hat einen rechteckigen Grundriss mit folgenden Abmessungen: Länge 12,91m, Breite 8,96m und Höhe 4,96m, das Raumvolumen beträgt 577m³. Mit einer Volumenkennzahl von 9,6 [m³/Platz] befindet sich der Kammersaal in einem für Musikdarbietung und Konzertsäle günstigen Bereich. Für Kammermusiksäle dieser Größe gilt eine Nachhallzeit 1,2s als günstig.[62]

[61] *Informationen zum Kammersaal der Universität der Künste Berlin.*
[62] Webers, Johannes: *Handbuch de Tonstudiotechnik.* : 8.Auflage. Poing: Franzis'Verlag, 2003. S 87.

Das Elektronische Studio der Technischen Universität Berlin

Das Elektronische Studio der Technischen Universität wird sowohl für Lehrveranstaltungen als auch zur Herstellung von Audiokompositionen, Produktion elektroakustischer Musik und Forschung genutzt. Das so genannte große Studio verfügt über ein zwölf Wege System für Surround-Wiedergabe.[63] Bei Produktionen halten sich hier ein bis zwei und bei Lehrveranstaltungen bis zu zwanzig Personen auf.

Der Grundriss des Raums ist nahezu quadratisch, die Länge beträgt 9,45m, die Breite 7,99m und die Höhe 3,12m bei einem Volumen von 235,57m³. Damit ist das Studio der kleinste für die Untersuchung verwandte Raum.

Mit einer mittleren Nachhallzeit von 0,5s erreicht das Elektronische Studio einen Wert, der im Bereich eines Sprecher- oder Hörspielstudios liegt.[64] Dies ist die kürzeste Nachhallzeit, die bei der Auswertung der monauralen Raumimpulsantworten ermittelt wurde.

Zwei Wände, die linke Wand und die Rückwand, sind mit Diffusern aus Holz bestückt. Die anderen beiden Wände bestehen aus durchgehenden Fensterfronten, die mit Vorhängen verdeckt werden können. Zur Zeit der Messungen waren die Vorhänge geöffnet.

Abbildung 9 180° Blick von der Messposition im Elektronisches Studio

[63] *Informationen zum Elektronischen Studio der Technischen Universität Berlin*.
[64] Dickreiter, Michael: *Handbuch der Audiotechnik.* 6. Auflage München: Saur Verlag, 1997. S. 35.

3.2. Das Messen mit der Sinussweep Technik

Die Messung mit der Sinussweep Technik mit anschließender Entfaltung kommt sowohl bei dem EASERA Messsystem als auch bei dem FABIAN-Messsystem zur Anwendung. Als Messsignale werden lineare Sinussweeps höherer Ordnung genutzt. Der große Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Messung mit Maximalfolgen ist, dass man schon nach einer Messung ein glattes Spektrum hat, die Messung mit Maximalfolgen zeigt erst nach mehreren Wiederholungen den beabsichtigten spektralen Verlauf. Damit ist zu erklären, dass sich die Messzeit bei der Messung mit Sweeps erheblich verkürzt. Der spektrale Unterschied zwischen einmaligem Sweep und periodisch wiederholten Sweeps ist sehr gering.[65]

Vor der eigentlichen Impulsantwortmessung erfolgt bei diesem Verfahren eine Referenzmessung am kurzgeschlossenen Messsystem[66]. Unter Verwendung dieser Referenzmessung erfolgt dann die Entfaltung des Messsignals, durch komplexe Division, und man erhält nach dieser Kompensation die Übertragungsfunktion $H(f)$.[67]

Formel 1 Faltungs Formel, Weinzierl (2008), S. 1095.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad ,$$

Dabei ist $X(f)$ das komplexe Spektrum des Anregungssignals und wird bei der Referenzmessung ermittelt. $Y(f)$ beschreibt das komplexe Eingangssignal. [68]

Der Sweep wird bei den Messungen jeweils der Nachhallzeitlänge der zu vermessenden Räume angepasst. Er sollte stets länger als die Nachhallzeit gewählt werden, um zum einen den Raum in einen statischen Zustand zu versetzten und zum anderen vor Ende der Messung ein Abklingen aller Frequenzen im Raum zu ermöglichen. Die Entfaltung (Dekonvolution) erfolgt linear.

---

[65] Müller, Swen: „Messtechnik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 1114, 1115.

[66] Eingang ist direkt mit Ausgang verbunden

[67] Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S. 118.

[68] Müller, Swen: „Messtechnik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 1095

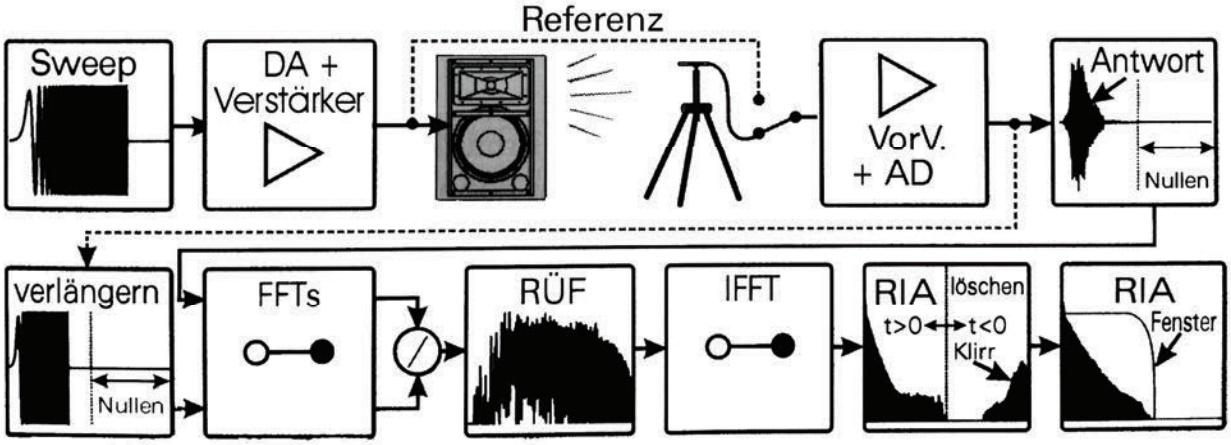


Abbildung 10 Blockdiagramm des Messverfahrens mit linearer Entfaltung aus Weinzierl(2008) S. 1115

Hierbei erfolgt sowohl über das Messsignal als auch über das Referenzsignal eine FFT[69] und danach werden beide Signale durcheinander geteilt. Die harmonischen Verzerrungsprodukte, die in der zweiten Hälfte der Raumübertragungsfunktion sichtbar werden, stellen negative Zeiten dar, diese nichtkausalen Anteile können einfach abgeschnitten werden.[70]

Die verwendeten Messsignale bei den monauralen und binauralen Raumimpulsantwortmessungen

Die verwendeten Messsignale sind synthetisierte lineare Sweeps höherer Ordnung. Bei EASERA konnten sie einfach vor Beginn der Messung aus einem Menü gewählt werden. Beim FABIAN- System werden die Sweeps im Vorfeld der Messungen im Mathlab® - Script festgelegt, es konnte auch hier aus einem Pool verschieden langer Sweeps gewählt werden. Es war nicht nötig, im Vorfeld der Messungen selbst die Messsweeps zu generieren.

[69]Fast Fourier Transformation

[70] Müller, Swen: „Messtechnik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 1114/1115

3.3. Der Lautsprecher der bei den Messungen zur Anwendung kam

Bei den Messungen der binauralen Raumimpulsantworten, die als BRIR - Datensätze bei den Hörversuchen zum Einsatz kommen, und der monauralen Impulsantworten, aus denen die physikalischen Parameter bestimmt werden, wurde jeweils ein Lautsprecher vom Hersteller Meyersound, Typ UPL-1 mit einem horizontalen Abstrahlverhalten von 30°genutzt. Er stammt aus dem Lautsprecherpool des Elektronischen Studios der TU Berlin und hat folgende (Inventarnummer **1397,** Seriennummer **G96AEC015)**. Der Lautsprecher kann einen maximalen Schalldruck von 124dB @ 1m erreichen und ist als Zweiwegesystem, bestehend aus 10“ Treiber für den unteren Frequenzbereich und einem 1“ Horntreiber für die hohen Frequenzen ausgelegt.[71]

Abbildung 11 Meyersound UPL-1 Aktivlautsprecher, l. bei der Messung im Kammersaal, m. ohne Frontabdeckung, r. Mit Frontabdeckung wie bei Messung
(Foto m. und r. stammen von der Website des Lautsprecherherstellers)

Die vom Hersteller angegebenen Werte von +-2dB von 50Hz bis 18kHz sind offensichtlich nicht realistisch und ließen sich bei der Auswertung der Daten einer Messung im reflektionsarmen Raum des Institutes für technische Akustik (ITA) an der TU Berlin, die durchgeführt wurde, um eine Referenzimpulsantwort zu erhalten, die für die Bestimmung des Stärkemaßes nötig war, nicht bestätigen..

[71] *Datenblatt für UPL-1 des Herstellers Meyer Sound,* 1995: S. 1-4.

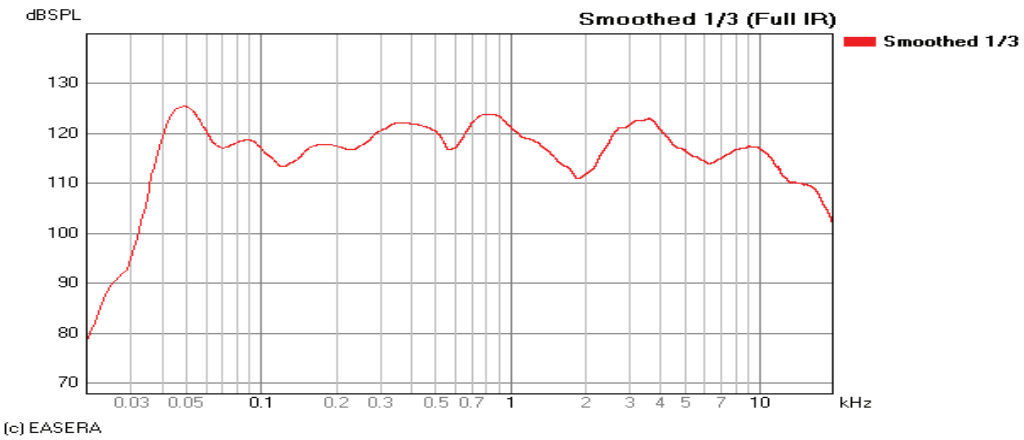


Abbildung 12 Frequenzgang Meyersound UPL - 1 in 10 m Abstand im RAR mit omnidirektionalem Messmikrofon bestimmt (erstellt mit EASERA)

Der Frequenzgang des Lautsprechers ist nicht linear. Er weist eine große Welligkeit von +-7dB und einen starken Einbruch im Frequenzverlauf bei ca. 2kHz auf. Der Abstand zwischen Messmikrofon der Firma BEHRINGER vom Typ ECM 8000 und dem Lautsprecher betrug 10m. Dies ist eine Vorgabe für die Bestimmung des Stärkemaßes.[72] Das Stärkemaß ist eines der physikalischen Maße, das später für die Korrelation mit den perzeptiven Daten aus den Hörversuchen genutzt wird.

Der Einsatz einer nichtlinearen gerichteten Schallquelle, wie der Meyersound UPL-1 bei dieser Studie, bietet Vor und Nachteile. Da bei Vorführungen in den untersuchten Sälen meist gerichtete Schallquellen in Form von Instrumenten, Sprechern, Sängern, oder Elektroakustik zum Einsatz gebracht wird, scheint die Verwendung von gerichteten Schallquellen zur Gewinnung der BRIRs sinnvoll. Dies entspricht eher den natürlichen Gegebenheiten in den Sälen als die Situation bei Verwendung einer omnidirektionalen Schallquelle. Der Lautsprecher UPL-1 wurde sowohl für die Akquise der BRIRs als auch der IRs genutzt. So wurde bei den Hörversuchen wie auch bei der Bestimmung der physikalischen Parameter dieselbe akustische Situation beurteilt.

Für einen kalibrierten omnidirektionalen Messlautsprecher spricht klar seine Linearität, da für die Messung der meisten physikalischen Maße nach den DIN oder ISO-Vorgaben kalibrierte omnidirektionale, lineare, breitbandige Schallquellen wie Messlautsprecher, Schreckschusswaffen für Akustiker oder Knallanreger genutzt werden sollten.[73] Es ist zu

---

[72] *Das Stärkemaß.* ISO (D) 3382, 2007.

[73] *Vgl ebenda*

erwarten, dass die in dieser Untersuchung ermittelten physikalischen akustischen Maße der Säle von den Maßen abweichen, die man mit omnidirektinaler linearer Schallquelle erhalten würde, also unter Messbedingungen nach DIN oder ISO -Vorschriften. Dieser Umstand beeinflusst aber in keiner Weise die Ergebnisse der hier vorgestellten Studie, da bei den Messungen in allen Räumen und an allen Plätzen derselbe Lautsprecher Verwendung fand. Die Aussagen zu Korrelationen zwischen physikalischen Maßen und perzeptiven Bewertungen können unter diesen Versuchsbedingungen ohne Weiteres erhoben werden, da eine Konstanz der Versuchbedingungen innerhalb der Untersuchung herrscht. Eine Kompensation der binauralen Raumimpulsantworten bezüglich des Frequenzgangs des zur Messung genutzten Lautsprechers fand nicht statt.

3.4. Die Messmikrofone und Messsyteme, die bei den monauralen Messungen zum Einsatz kamen

Das BEHRINGER ECM 8000 (omnidirektionales Messmikrofon)

Das ECM 8000 der Herstellerfirma BEHRINGER ist ein lineares omnidirektionales Messmikrofon mit einem linearen Frequenzgang im Bereich von 15Hz bis 20kHz. Es ist ein Elektret Kondensator Mikrofon und wird mit +15 V bis +48 V Phantomspeisung betrieben. Bei den Messungen zu dieser Untersuchung kam es ohne Poppschutz oder Windschutz zum Einsatz, da alle Messungen innerhalb geschlossener Räume stattfanden.[74]

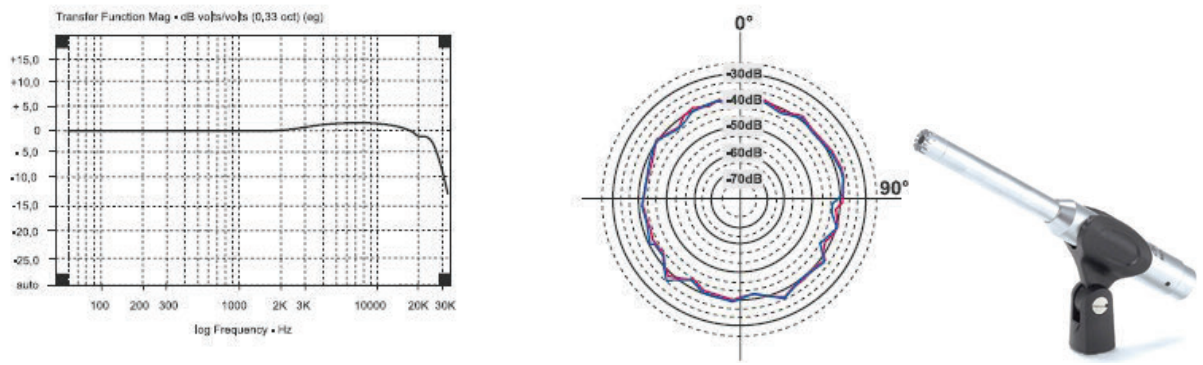


Abbildung 13 Frequenzgang und Abstrahlcharakteristik BEHRINGER ECM 8000, (Grafiken entstammen der Herstellerwebseite)

---

[74] *Datenblatt BEHRINGER ECM 8000, Version 1.2.* 2000.

Dieses Mikrofon kam zusammen mit dem EASERA Messsystem der Firma Software Design Ahnert GmbH (SDA), bei den Messungen der monauralen Impulsantworten zur Anwendung.

Das EASERA Messsystem

Das EASERA- Messsystem der Firma SDA ist Mehrkanal FFT-Messsystem. Es besteht aus einer Software EASERA 1.1 und einer Soundkarte mit eingebauten Mikrofonvorverstärkern und Phantomspeisung. Bei dieser Arbeit wurde die Messung mit der Sinussweeptechnik genutzt. Diese wurde im Kapitel 3.2. schon näher erläutert.[75]

Der Prinzipielle Messaufbau bei den Messungen der monauralen Raumimpulsantworten

Die Messung der monauralen Impulsantworten erfolgte einkanalig mit dem EASERA Messsystem. Der Messaufbau ist schematisch in einem Blockdiagramm dargestellt. Der Weg der Referenzmessung ist mit eingezeichnet, diese erfolgte aber im Vorfeld der eigentlichen Messung der monauralen Raumimpulsantworten.

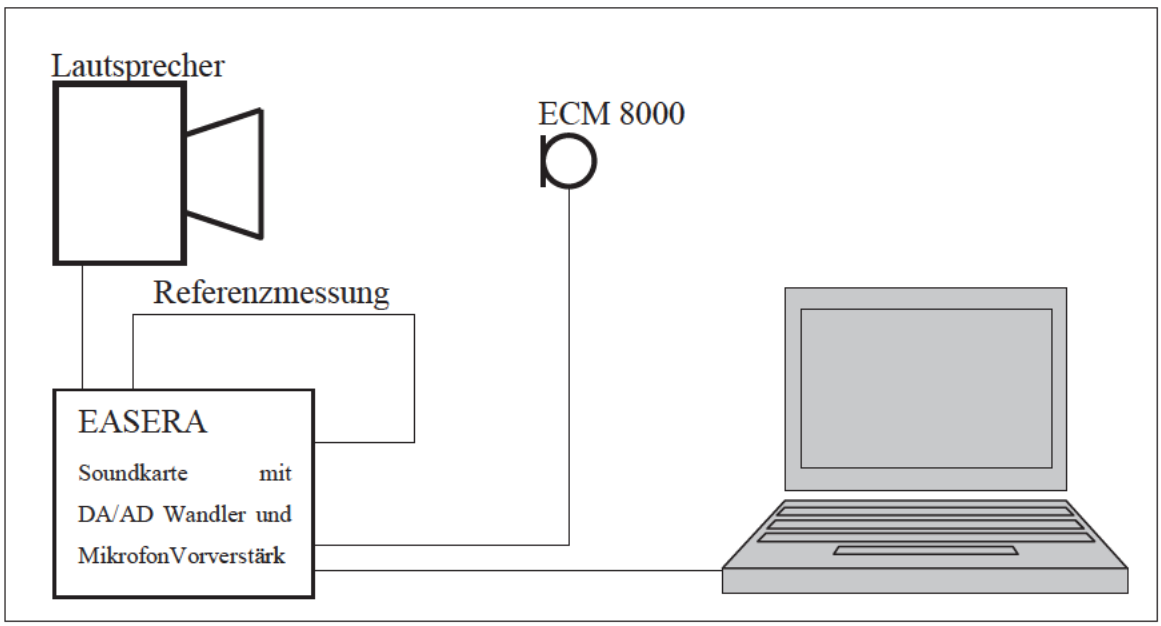


Abbildung 14 Blockdiagramm des Messaufbaus für die Messungen mit EASERA

[75] *EASERA tutorial Version 1.1*, 2006. S 7,8.

3.5. Die Messmikrofone und Messsyteme die bei den binauralen Messungen zum Einsatz kamen

Das Binaural Mess- und Wiedergabesystem FABIAN

FABIAN ist ein über mehrere Freiheitsgrade des menschlichen Kopfes freibewegliches Kunstkopfmessrobotersystem zur Aufnahme von binauralen Raumimpulsantworten, durch dessen Einsatz es möglich ist, Räume mittels dynamischer Binauralsynthese zu auralisieren.

Abbildung 15 Fabian Messroboter

Mit diesem System ist es zum ersten Mal möglich, Hörtests durchzuführen, die die Wahrnehmung von Hörern untersuchen, bei denen direkt auf unterschiedliche binaural dynamisch gerenderte akustische Umgebungen zugegriffen wird. Anders als bei der Wiedergabe mit Wellenfeldsynthese oder anderen lautsprecherbasierte Wiedergabesystemen, ist mit FABIAN durch die Kopfhörerwiedergabe eine äußerst reale 3D Simulation akustischer Umgebungen möglich.[76]

FABIAN ist ein Software kontrollierter, automatisierter Kunstkopf-Torso-Simulator mit multiplen Freiheitsgraden und integriertem mehrkanaligem Messsystem zur Akquise der binauralen Raumimpulsantworten mit hoher räumlicher Auflösung. Der Oberkörper ruht auf einem Unterteil mit Drehteller knapp über dem Boden. Dieser kann unabhängig vom

[76]Slavik ,Karl M. und Weinzierl, Stefan: „Wiedergabeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik*. : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 671.

Halsgelenk bewegt werden. Bei den Messungen für diese Magisterarbeit wurde nur der Oberkörper mit Halsgelenk genutzt. Der Torso wurde zur Messung auf einem Stuhl oder Zuschauersessel platziert und gegen Herunterfallen gesichert, dies machte den Einsatz des Fußes überflüssig.

Bauform und Materialien des FABIAN Messsystems

Der Kopf und die Ohren entstanden nach einen Abguss des Kopfes von Christoph Moldrzyk. Die Ohren des Systems bestehn aus Silikon und sind auf einer Aluminiumplatte montiert. Die Mikrofone sind durch einfaches Stecken darin zu befestigen. Der Kopf sowie der Korpus sind aus Gips gefertigt, die tragende Innenkonstruktion aus einem Modellbaukunststoff auf Polyurethanbasis. Beim Bau des Korpus wurde versucht, intergeschlechtliche Varianz zu berücksichtigen[77]. Während einer Messung ist der Korpus mit einem T-Shirt bekleidet.

Der Hals enthält einen Servogelenkmotor und ist mit einer Halskrause verkleidet. Das Halsgelenk ist über 2 Freiheitsgrade beweglich und stammt von der Firma Amtec. Es wird durch einen Computer über eine RS 232 Schnittstelle gesteuert. Die mögliche erreichbare Genauigkeit des Gelenks beträgt +/-0,02 Grad[78]. Dieser Rechner wird gleichzeitig für die Messung der binauralen Raumimpulsanworten genutzt. Die Steuerung und der Betrieb des Messroboters erfolgen durch ein von Lindau implementiertes Mathlab® Script. Nach Eingabe der gewünschten Parameter wie Auflösung und Signallautstärke wird das Messsystem gestartet und arbeitet nun bis zum Ende der Messung automatisch. Wird ein Übersteuern der Mikrofonkanäle vom System erkannt, wird die Messung dieser binauralen Raumimpulsantwort mit geringerem Pegel wiederholt, ist das Signal zu leise, geschieht dies mit einem höheren Pegel.

---

[77]Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S. 75.
[78]Vgl ebenda S. 91, 92.

Die Wahl der Winkelschrittweite von FABIAN

Nach Angaben von Blauert beträgt die minimale Lokalisationsunschärfe auf der Horizontalebene ca. ±3,6° und auf der Vertikalebene ±9°.[79] Damit liegt die für die hier vorgestellte Untersuchung verwendete Auflösung mit horizontal ±2° (Messung in allen Räumen) und vertikal ±4°(nur bei der Messung im Burgtheater) deutlich unter den von Blauert genannten Wahrnehmungsgrenzen. Neueste Untersuchungen von Lindau im Rahmen der weiteren Evaluierung des FABIAN Mess- und Wiedergabesystems zeigen, das die hier gewählte Auflösung ausreichend klein ist.

Laserpointer als Zieleinrichtung und Kompensationsmessung für die Zieleinrichtung

Um vergleichbare Messbedingungen in jedem der Räume zu schaffen, wurde für FABIAN im Rahmen dieser Magisterarbeit, eine Laser-Zielvorrichtung entworfen. Sie besteht aus einem zweiteiligen Aluminiumblock. In eine Bohrung des Blocks ist ein Laserpointer eingeklemmt. Dieser lässt sich durch das Eindrehen einer kleinen Plastikschraube oberhalb seines Netzschalters permanent ein- und ausschalten. Der Aluminiumblock hat an den Seiten jeweils eine Führung so dass er perfekt an das Halsgelenk passt, wo er mittels zweier Schrauben fixiert werden kann. Dafür wurden am Halsgelenk zwei Bohrungen gesetzt und mit Innengewinde versehen.

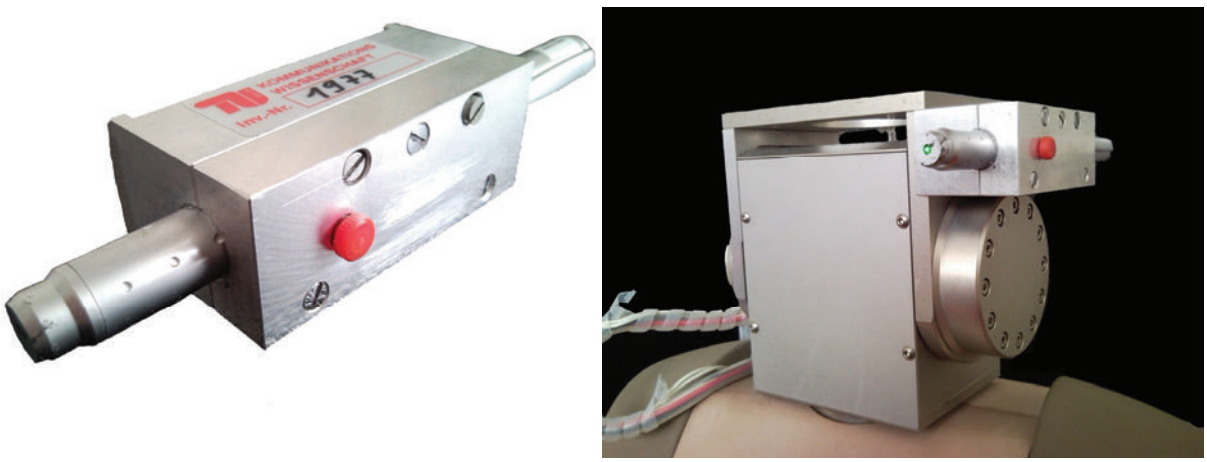


Abbildung 16 Laserpointer in Aluminiumträger l. und am Halsgelenk r.

[79] Blauert, Jens.: *Räumliches Hören.* Suttgart: Hirzel Verlag. 1974. S. 33,36.

Der Laser schoss aus dem Laserpointer leider nicht völlig gerade und hat trotzt Haltevorrichtung einen Versatz von 2° nach oben und 0,3° nach rechts. Für die späteren Messungen wurde diese Abweichung genau ermittelt. Der Versatz wurde an einer 192cm (Laseraustritt aus Pointer bis Schienenende) langen definiert geraden Schiene gemessen und betrug auf diese Entfernung 6,8cm vertikal nach oben und 1cm horizontal nach rechts. Um dies zu kompensieren, wurde der FABIAN - Kopf zum Einrichten der Messposition um 2° nach unten und 0.3° nach links gefahren und danach mittels Laserstrahl auf den LS ausgerichtet. Danach wurde der Kopf wieder in 0° 0°-Stellung gefahren und die Messung, nach Demontage der Zielvorrichtung, gestartet. So ließ sich sicherstellen, dass FABIAN ganz gerade auf den LS ausgerichtet war. Durch die Demontage der Zielvorrichtung und das Anbringen der Halskrause wurden ungünstige akustische Einflüsse der Zielvorrichtung im Vorab ausgeschlossen. Da die Zielvorrichtung zum Zeitpunkt der Messungen im Audimax und im Elektronischen Studio noch nicht existierte, kann es sein, dass diese binauralen Datensätze bei den Hörtests eine Wahrnehmung der Elevation des Messlautsprechers bei den Versuchsteilnehmern auslösten.

Die Mikrofone des FABIAN Systems

Als Mikrofone für FABIAN wurden omnidirektionale Miniaturmikrofone gewählt, da auch das Trommelfell als ungerichteter Druckempfänger arbeitet. Der Frequenzgang der Mikrofone sollte relativ linear sein und beide Kanäle möglichst identisch. Geringe Abweichungen im Frequenzgang der Mikrofone sind zu verschmerzen, da die Frequenzgänge in der Nachbearbeitung geglättet, also kompensiert werden. Es kamen vorpolarisierte Elektrtkondensatormikrofone der Firma DPA vom Typ 4060 zum Einsatz, deren Vorverstärker von der Kapsel abgesetzt sind und nicht im Kopf Platz finden müssen.. Durch seine geringe Kapselgröße und Miniatur-Bauform, ließ sich dieser Mikrofontyp besonders einfach im Gehörgang des Kunstkopfes implementieren.[80] Das Mikrofon DPA – 4060 wird mit +48V Phantompower gespeist.

[80]Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S. 72-75.

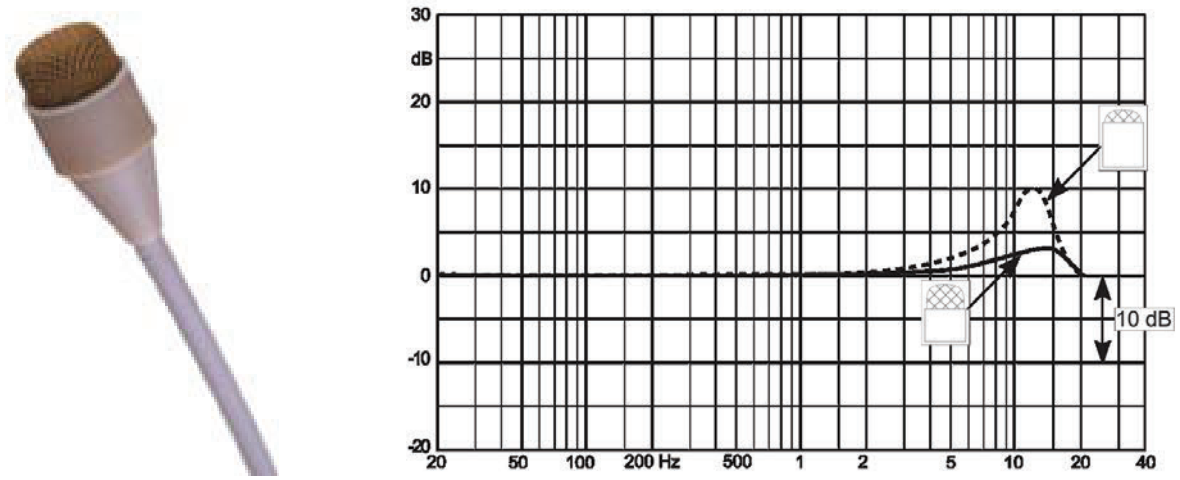


Abbildung 17 Für Fabian genutztes DPA Mikrofon und Frequenzgang (entstammen der DPA homepage)

Der Dynamikbereich des DPA – 4060 beträgt 100dB, der maximal mögliche Schalldruckpegel vor Übersteuerung ist mit 134dB angegeben.[81]

Die Soundkarte und die Mikrofonvorverstärker des FABIAN Systems

Die im FABIAN Messystem verwendete Soundkarte stammt von der Firma RME und ist vom Typ Hammerfall Multiface. Es ist ein AD/DA[82] Interface und wird via PCMCIA mit dem Messlaptop verbunden. Der für die Pantomspeisung und Anpassung der Mikrofonsignale nötige Mikrofonvorverstärker kommt von der Firma RME, Typ QUADMIC.

Der Prinzipieller Messaufbau bei den Messungen der binauralen Raumimpulsantworten

Die Messung der binauralen Impulsantworten erfolgte zweikanalig mit dem FABIAN Messsystem. Die Steuerung des Messablaufs und die Aufzeichnung der binauralen Raumimpulsantworten wurden durch ein eigens dafür von Lindau entwickeltes Mathlab® Script gesteuert. Der Weg der Referenzmessung ist auch hier im Blockdiagramm mit eingezeichnet, erfolgte aber im Vorfeld der eigentlichen Messung der binauralen Raumimpulsantworten.

---

[81] *Datenblatt DPA-4060.*
[82] Analog Digital/Digital Analog Wandler

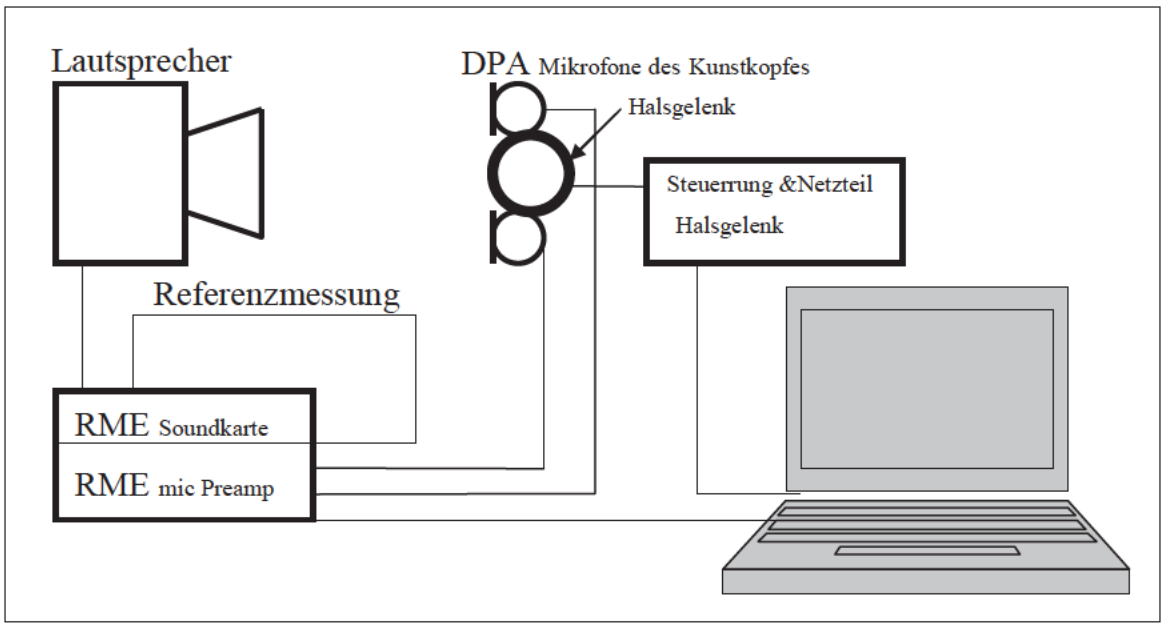


Abbildung 18 Blockschaltbild des Messaufbau für das FABIAN-System

3.6. Das Postprocessing der Binauralsets

Bei der Nachbearbeitung der gemessenen Binauralsets wurde eine Kompensation der Mirkofonfrequenzgänge und des Kopfhörerfrequenzgangs durchgeführt. Sie erfolgt durch einfache Schleifenmessung des Wiedergabeaufbaus mit Kopfhörer und Mikrofonen. Für die Schleifenmessung wurden der Kunstkopf und der bei der Wiedergabe eingesetzte Kopfhörer des Herstellers STAX vom Typ STAX Lambda SR 202 benutzt. Das für die Kompensation nötige Filter erhält man durch Invertierung des bei der Schleifenmessung ermittelten komplexen Frequenzgangs des Systems Kopfhörer und Mikrofone. So werden in einem Zug die Frequenzgangs- und Phasenverzerrungen des Kopfhörers und der Mikrofone kompensiert.[83] Das Verfahren wird unentkoppelte Entzerrung genannt. Die Entzerrung der Mikrofone ist relativ unproblematisch, da die Verformung des Frequenzganges durch die DPA Mikrofone sehr gering ausfällt.[84] Beim Kopfhörer treten schmalbandige Einbrüche im oberen Frequenzbereich auf. Daraus ergeben sich peaks im hochfrequenten Bereich nach der Invertierung. Durch Mittelung des Frequenzgangs können diese entschärft werden.

[83]Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S 58
[84]Vgl. ebenda. S. 59.

Die binauralen Raumimpulsantworten wurden im Rahmen der Nachbearbeitung auch normalisiert, ein Teil des Nachhallschwanzes wurde abgeschnitten und durch einen richtungsunabhängigen statistischen Nachhallschwanz ersetzt. Das ist möglich, da nachweislich kein entscheidender Einfluss des Nachhallschwanzes auf die Wahrnehmung der Lokalisation im Raum zu verzeichnen ist. Hierzu trägt eher der initiale Teil der binauralen Raumimpulsantwort bei, die nach Meesawat und Hammershøi schon nach etwa 40-60ms ohne perzeptive Konsequenzen abgeschnitten werden kann.[85] Bei Hörtests im Rahmen der Evaluierung des FABIAN-Systems konnten trainierte Hörer noch Werte von 140ms wahrnehmen. Da das System auch für trainierte Hörer noch funktionieren soll, entschied Lindau sich für ein Abschneiden des Nachhallschwanzes bei ca. 370ms.[86] Dadurch reduzierte sich die zu verarbeitende und im Arbeitsspeicher des Auralisationsrechners bereitzustellende Datenmenge weiter, und machte das System bei der Wiedergabe wesentlich leistungsfähiger.[87]

3.7. Die Wiedergabe mit FABIAN

Die Wiedergabe erfolgt headtrackergesteuert via Kopfhörer durch eine in Echtzeit arbeitende Faltungssoftware. Diese Software läuft unter dem Betriebssystem Linux OS und ist implementiert als JACK Audio server client[88]. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Faltungssystems ist die Größe des Arbeitsspeichers des Faltungsrechners. Die Nutzung der Faltung binauraler Raumimpulsantworten mit nachhallfrei aufgenommenen Sprach- und Musiksignalen macht es möglich nicht nur direkt zwischen binauralen Datensets, sondern auch zwischen verschiedenen Stimuli direkt umzuschalten. Hierfür steht ein leistungsfähiger Computer zur Verfügung. Dieser Aufbau bietet die Möglichkeit zum Rendern multipler akustischer Umgebungen und kann so zur Durchführung von Hörtests mit unterschiedlichem Testdesign genutzt werden. Es ist verständlich, dass ein leistungsstärkerer Rechner Systemlatenz verringert und die Möglichkeit bietet bei der dynamischen Binauralsynthese mit umfangreicheren Ausgangsdaten zu arbeiten. Bei der Akquise der BRIR Sets können bis zu

---

[85] Kittiphong, Meesawat: "The time when the reverberation tail in a binaural room impulse response begins". In: *115th AES Convention, New York, 2003.* Preprint 5859. S. 1-9.

[86] Lindau, Alexander und Hohn, Torben und Weinzierl, Stefan: "Binaural Resynthesis for comparative studies of acoustical environments". In: *122th AES Convention, Vienna, 2007.* Preprint 7032. S. 4, 5

[87] Lindau, A.: Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006. S. 44

[88] *Informationen zu Jack audio*.

acht Quellen gleichzeitig gemessen werden. [89] Bei der hier vorgestellten Untersuchung wurde nur mit einer Quelle gearbeitet.

4. Der Versuchsaufbau und die Durchführung der Messungen

4.1.Die Position des Lautsprechers

Als Lautsprecherposition wurde in jedem Raum eine Stelle auf der Bühne gewählt, die bei typischer Raumnutzung als repräsentativ für das Bühnengeschehen angesehen werden kann. Im Audimax wurde der Lautsprecher an die Position gestellt, an der sich normalerweise der Referent aufhält, in der Mitte der Bühne aber leicht nach links versetzt.
Im Burgtheater wurde der Lautsprecher auf die Linie des eisernen Vorhangs platziert, also im vorderen Teil der Bühnenmitte.
Im Friedrichstadtpalast stand der Lautsprecher für die akustische Anregung des Saals in der Bühnenmitte, nicht weit von der Bühnenkante entfernt.
Im Kammersaal der Universität der Künste wurde die Lautsprecherposition in der Mitte des Drittels des Raums gewählt, an dem bei Aufführungen ein Flügel steht oder sich das Hauptbühnengeschehen abspielt. Im Elektronischen Studio hing der Lautsprecher auf der Standardposition, die bei der Mehrkanalbeschallung für den Centerlautsprecher genutzt wird.

4.2.Die Positionen des Messmikrofons und des Messroboters FABIAN

Die Auswahl der Messpositionen für die vorgestellte Studie orientiert sich weitgehend an den von Wilkens und Lehmann für ihre Untersuchung genutzten Messpunkten. Es werden aber nur zwei Plätze pro Saal mit dem Kunstkopf vermessen, um den Aufwand zu gering zu halten.

---

[89] Lindau, Alexander und Hohn, Torben und Weinzierl, Stefan: "Binaural Resynthesis for comparative studies of acoustical environments". In: *122th AES Convention, Vienna, 2007.* Preprint 7032. S. 1-3.

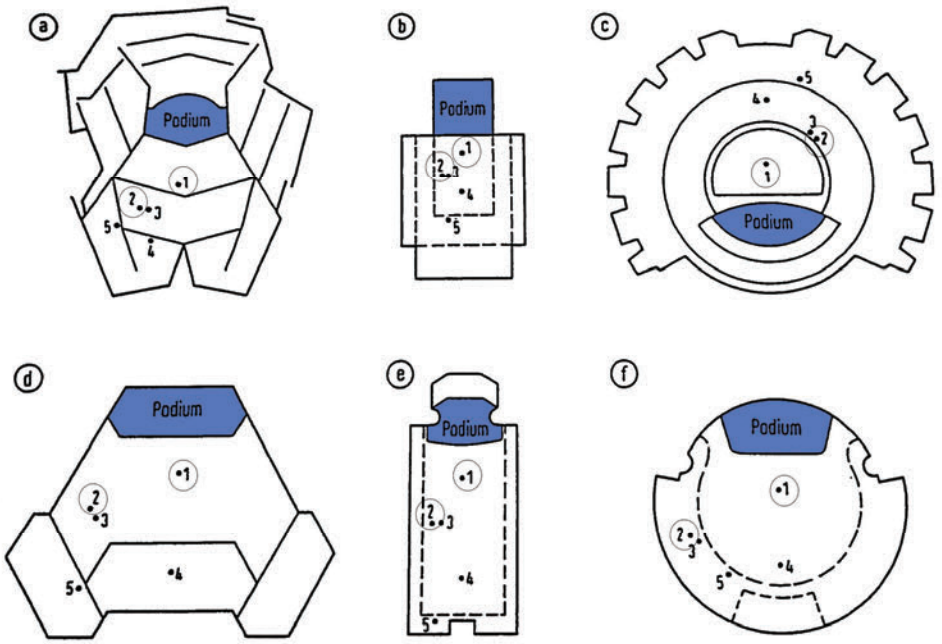


Fig. 1. Grundrisse der Säle mit den eingezeichneten Aufnahmeplätzen. (a) Philharmonie Berlin, (b) Musikhalle Hamburg, (c) Stadthalle Hannover, (d) Stadthalle Braunschweig, (e) Stadthalle Wuppertal, (f) Rheinhalle Düsseldorf.

Abbildung 19 Raumgrundrisse mit Messpositionen von Wilkens(1980), S.258

Es wurde versucht etwa gleiche Bedingungen bezüglich des Hallradius für die Messpositionen eins und zwei für alle Räume zu schaffen. Die erste Position entspricht der Position eins bei Wilkens und Lehmann. Sie befindet sich nahe an der Bühne und nahe am Hallradius des verwendeten Lautsprechers auf dessen Achse. Die Messposition eins repräsentiert in allen Räumen einen der „guten“ Sitzplätze. Die zweite Messposition soll einen eher ungünstigen Sitzplatz repräsentieren. Sie wurde deshalb aus der Mitte heraus nach links versetzt und im hinteren Teil der Räume gewählt. Sie ist um den mehrfachen Hallradius vom Lautsprecher entfernt. Vergleicht man die Messposition zwei mit den Positionen. Bei Wilkens und Lehmann, liegt sie jeweils etwa zwischen deren Positionen zwei und fünf bei Wilkens, Lehmann. Bei den Messungen im Audimax ist die zweite Position auch auf Achse. Das kommt daher, dass der aus der Datenbank des Fachbereichs für Audiokommunikation stammende Datensatz bereits vorhanden war und deshalb, um den Aufwand für diese Arbeit geringer zu halten, auf eine Neuanfertigung des binauralen Datensatzes mit veränderter zweiter Position verzichtet wurde. Auch der Datensatz des Elektronischen Studios stammt aus dieser Datenbank. Er enthält nur eine Messposition an einer idealen Sitzposition.

4.3.Die Messung der monauralen und binauralen Raumimpulsantworten in den Räumen

Der Ablauf der Messungen der binauralen und der monauralen Raumimpulsantworten in den untersuchten Sälen vollzog sich wie folgt: Die Anregungssignale wurden, bezüglich ihrer zeitlichen Länge für alle Räume so gewählt, dass sichergestellt werden konnte, dass der Saal in einen stationären Zustand gebracht wurde. Sie waren jeweils länger als die Nachhallzeiten de entsprechenden Räume.[90] Danach wurde der Pegel des Anregungssignals überprüft und so eingestellt, dass der Lautsprecher und die Messmikrofone nicht übersteuerten. Trotzdem wurden die Signale so laut wie möglich gepegelt. Dies geschieht, um den Signal-Rauschabstand der aufgenommenen Impulsantworten zu erhöhen. Anschließend erfolgte eine Referenzmessung des Messsystems, bei dem der Ausgang direkt mit dem Eingang verbunden wurde. Die Referenzmessung geschieht, um später das Anregungssignal von Impulsantwort zu entfalten.[91] Danach wurde die eigentliche Messung gestartet. Nach Abschluss der Messungen an Mikrofonposition 1 erfolgte ein Umbau auf Position zwei und dann folgte derselbe Ablauf wie bei der ersten Messung. Bei allen Messungen betrug die Temperatur ca.23°C.

Die Beschreibung der Messung der binauralen Raumimpulsantworten im Wiener Burgtheater

Der Hallradius im Burgtheater betrug etwa 4,8m. Als Messsignal wurde ein Sweep verwandt, *SWP18_gap2000msec_20dB_100Hz_6dBLowshelf_fu_20Hz_fo_22.05kHz_LIRI_norm.WAV* .
Der Pegel des Messsignals in Mathlab® betrug -17db bei einer Temperatur von 23°C
Der Lautsprecher wurde hier in der Mitte der Bühne auf Höhe des eisernen Vorhangs positioniert und stand auf einem Stativ in Höhe von 1,50m[92]. Dieses Setting entspricht auch den Gegebenheiten, die herrschen, wenn sich ein Schauspieler in der Bühnenmitte auf Höhe des Eisernen Vorhangs befindet um sein Stück vorzutragen. Die Messung im Burgtheater erfolgte an zwei Positionen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

---

[90]Müller, Swen: „Messtechnik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 1087-1170. S. 1114
[91]Vgl. ebenda. S 1114
[92] gemessen vom Boden bis zur Lautsprechermitte

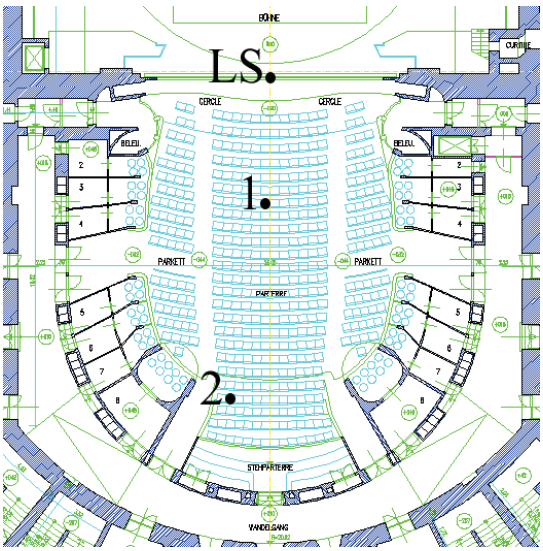


Abbildung 20 Burgtheater Messposition 1 und 2 und Lautsprecherposition (entnommen der Burgtheater website)

Die erste Messposition war Platz zehn links in der dritten Reihe. Dieser Sitz war auf Achse des Lautsprechers aber geringer elevisiert als dieser. Der Abstand zwischen Lautsprecher und Kopfmitte des FABIAN-Systems betrug 8,41m und wurde mit Hilfe eines Laser Entfernungsmessers[93] ermittelt. Das entsprach etwa dem doppelten Hallradius. Die Entfernung weicht von den aus der Raumimpulsantwort ermittelten Werten ab, da der Lasermesser nur die Entfernung bis zu Lautsprecherabdeckung maß. Bei der IR ist der Abstand zwischen Gitter und Horn auch noch enthalten. Die Messung an Position eins startete um 1.40 Uhr und endete um 6.20 Uhr, damit betrug die reine Messdauer vier Stunden und vierzig Minuten. Laut Software sollte die geschätzte Dauer nur zwei Stunden betragen. Da aber einige Messungen vom System automatisch wiederholt wurden, ist die längere Messdauer plausibel. Der Saal hatte zur Zeit der ersten Messung folgenden Zustand: Alle Türen waren geschlossen, die Logenvorhänge geöffnet, es befanden sich keine Personen im Theater, die Ränge waren voll bestuhlt, der Orchestergraben hochgefahren und die Bühnenkante in ca. einem Meter Höhe vor ersten Sitzreihe, die Bühnenkante war mit Velours bezogen, auf der Bühne standen einige Stühle links und rechts des Lautsprechers, der eiserne Vorhang war offen, die Hinterbühne offen und ohne Bühnenbild, in der Mitte der Hinterbühne wurden große Kulissenelemente gelagert und die Klimaanlage oberhalb der Hinterbühne war aus brandsschutztechnischen Gründen in Betrieb.

Die zweite Messung erfolgte in Rang 1, Reihe 2 Platz 2 links. Der Abstand zum Lautsprecher, mit Entfernungsmesser bestimmt, betrug 20,69m und entsprach damit ca. dem 4,3 fachen Hallradius. Dieser Sitz war nach links[94] aus der Achse des Lautsprechers versetzt, aber höher elevisiert als dieser. Der Pegel des Stimulus betrug bei der zweiten Messung -4db im Mathlab® Script. Die Temperatur im Saal betrug wie am Vortag 23°C. Beginn der

[93] BOSCH DLP-50
[94] Links mit Blickrichtung Bühne

Messung war um 23.30Uhr, sie endete um 04.00 Uhr. Die Dauer der Messung betrug vier Stunden und dreißig Minuten. Der Saal befand sich zur Messung in folgendem Zustand: Alle Türen waren geschlossen, die Logenvorhänge offen, das Theater leer, die Bühnenkante befand sich 3,85m näher am eisernen Vorhang und es waren 4 Reihen mehr bestuhlt als am Vortag. Der Orchestergraben war hochgefahren, die Bühnenkante befand sich in ca. einem Meter Höhe vor der ersten Sitzreihe, die Bühnenkante war mit Velours bezogen, der eiserne Vorhang war offen, die Hinterbühne war mit Kastenförmigen Bühnenbild verstellt, in die Wände des Bühnenbilds waren offene Fenster eingearbeitet, deren Fensterflügel in verschiedenste Richtungen standen, in der Mitte der Hinterbühne wurden große Kulissenelemente gelagert und auch an diesem Abend war die Klimaanlage oberhalb der Hinterbühne aus brandsschutztechnischen Gründen in Betrieb.

Die Beschreibung der Messung der BRIRs im Palast

Der Hallradius im Friedrichstadtpalast beträgt ca. 6m, die Temperatur während der Messungen maß 22,5°C. Die Mitte des zur Messung genutzten Lautsprechers befand sich auf 1,50m Höhe über dem Bühnenboden. Im Palast wurde an zwei Messpositionen gemessen. Beide Messungen konnten in einer Nacht durchgeführt werden, da nur auf der 0° Ebene horizontal gemessen wurde. Deshalb sind die äußeren Bedingungen im Saal bei beiden Messungen gleich, nur die Position des Messroboters ist jeweils anders. Während der Messungen waren die Türen geschlossen, der Saal war leer, die Bühne war ebenfalls leer, nur im hinteren Teil der Bühne war ein Bühnenbild geparkt. Die Vorhänge waren offen, dies galt auch für den eisernen Vorhang. Die Lautsprecherposition auf der Bühne befand sich nahe der Bühnenkante in deren Mitte. Das Anregungssignal war wie bei den Messungen im Burgtheater ein Sweep.

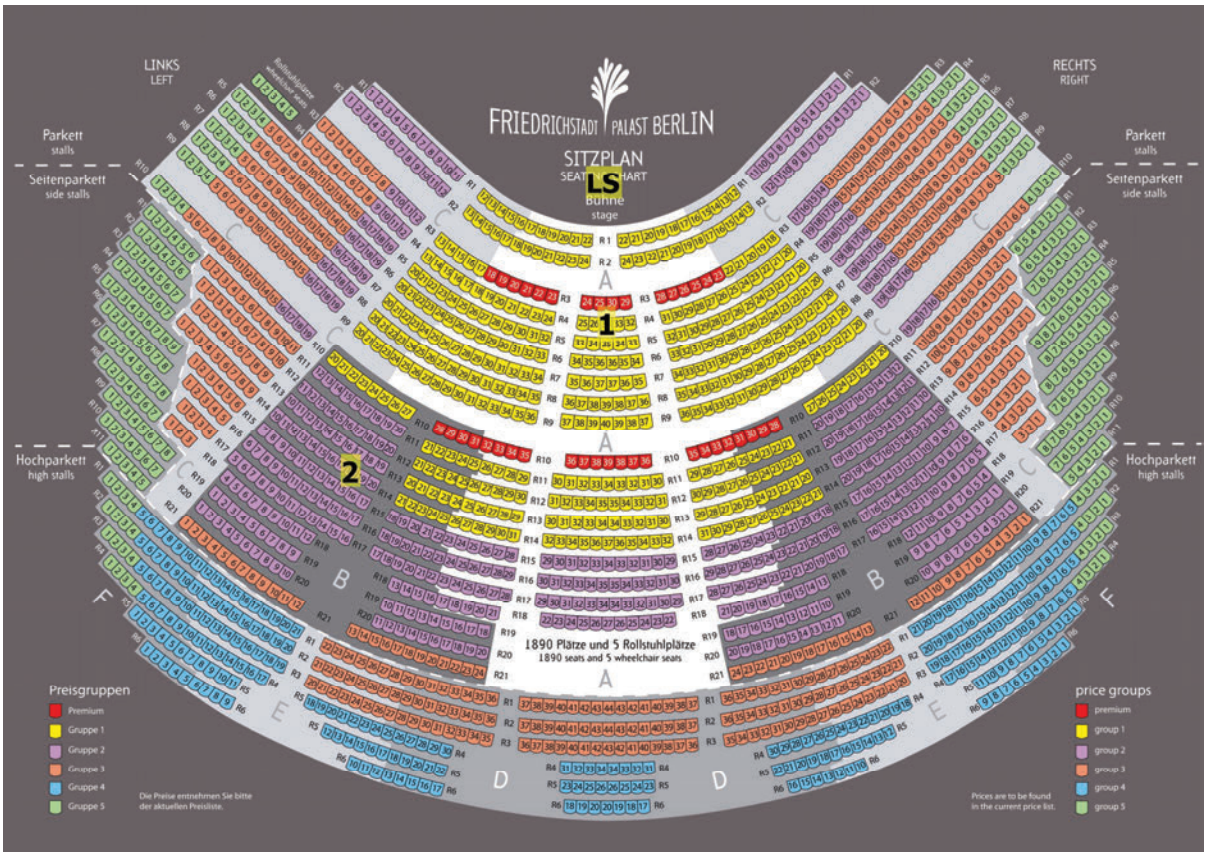


Abbildung 21 Sitzplan Friedrichstadtpalast mit Messpositionen (1,2) und Lautsprecherposition (LS) (Quelle: Website Friedrichstadtpalast)

Die erste Messung im Friedrichstadtpalast erfolgte in Reihe 4 Platz 34. Der Abstand zwischen Kunstkopf und Lautsprecher betrug 5,55m, mit Entfernungsmesser ermittelt. Das entspricht etwa dem einfachen Hallradius Der Kopf befand sich auf Achse des Lautsprechers und etwa in selber Höhe. Die Stimuluslautstärke wurde mit -10dB im Mathlab® Script eingegeben.

Die zweite Messposition war in Reihe 14 Platz 18 im Parkett links aus der Achse des Lautsprechers heraus versetzt und erhöht. Der Abstand zwischen Lautsprecher und Kopfmitte betrug hier 16m, etwa der 3 fache Hallradius.

Die Beschreibung der Messung der BRIRs im Kammersaal

Der Hallradius im Kammersaal der UdK beträgt ca. 1,30m. Als Anregungssignal wurde ein Sweep von 1,5s Länge genutzt. Der Pegel wurde im Mathlab®-Script mit -18dB festgelegt. Die Temperatur im Saal betrug 23°C. Die Messung fand nachts um 22Uhr statt und dauerte ca. 2h inklusive Auf und Abbau. Der Kopf von FABIAN war auf Sitzhöhe bei 1,20m , die Lautsprecherhöhe betrug 1,50m. Der Lautsprecher stand auf einem Stativ in der Raummitte, 9,5m von der Tür entfernt im "Bühnenbereich" des Raumes und je 4,60m von den Seitenwänden entfernt. Die Vorhänge der 3 großen Fenster waren geöffnet, und der Raum war mit 60 Stühlen bestückt.

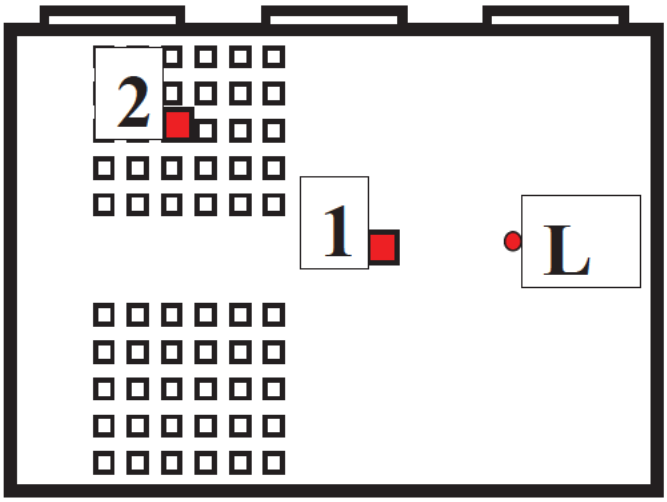


Abbildung 22 schematischer Grundriss Kammersaal

Während der ersten Messung betrug der Abstand zwischen Lautsprecher und Kopf 3m[95]. Der Messroboter saß in der Raummitte je 4,60m von den Seitenwänden entfernt auf der Achse des Lautsprechers. Der Pegel des Anregungssignals betrug -18 dB

Bei der zweiten Messung war der Pegel des Anregungssignals -15dB, der Kopf und der Lautsprecher hatten einen Abstand von 7,57m[96]. Der Abstand von der rechten Wand mit Blickrichtung Bühne betrug 7,30m. FABIAN war aus der Achse des Lautsprechers heraus versetzt nach links im hinteren Teil des Raumes platziert.

[95] Zweifacher Hallradius
[96] Sechsfacher Hallradius

Die Besonderheiten bei den Messungen im Elektronischen Studio und Audimax

Die Messungen mit FABIAN fanden nicht im Rahmen dieser Arbeit statt und wurden der Datenbank des Fachbereichs für Audiokommunikation der TU-Berlin entnommen, deshalb werden hier nur die Messpositionen genau erläutert.

Die Beschreibung der Messung der im Elektronischen Studio

Der Hallradius im elektronischen Studio maß 1,20m, der Abstand zwischen Kopf und Lautsprecher 3m[97]. Die Kunstkopfposition befand sich am Sweetspot der Studioabhörposition direkt vor dem Mischpult auf Achse des Lautsprechers im Abstand von 1,20m. Der Lautsprecher hatte eine Höhe von 1,80m, von der Lautsprechermitte aus gemessen. Die Vorhänge des Studios waren offen.

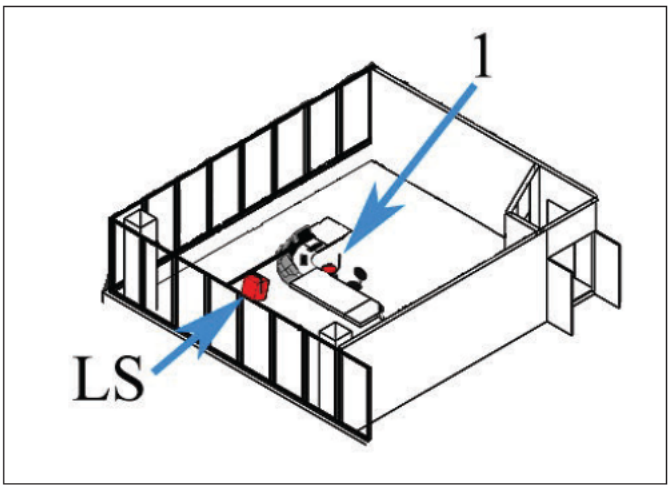
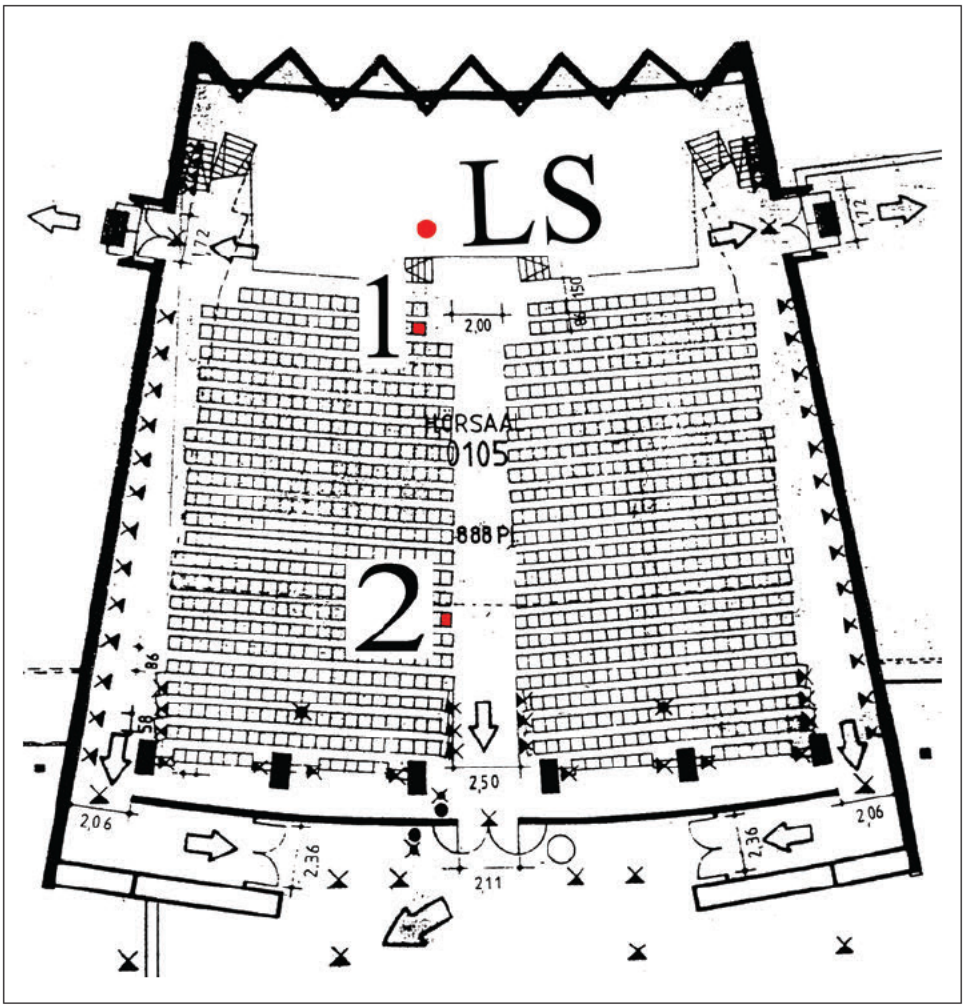


Abbildung 23 Grundriss großes Studio mit Mess und Lautsprecherposition
(Quelle: Hompage Studio, Grafik verändert)

Die Beschreibung der Messung im Audimax

Der Hallradius im Audimax beträgt 3,80m. Beide Positionen von FABIAN befanden sich auf Achse mit dem Lautsprecher. Der Lautsprecher stand nicht weit von der Bühnenkante entfernt, aber leicht aus der Mitte nach links verrückt, um eine Messung auf Achse zu ermöglichen.

[97] ca. zweieinhalbfacher Hallradius



Bei der ersten Messung betrug der Abstand des Lautsprechers vom Kunstkopf 4m[98]. Der Kopf befand sich tiefer als Lautsprecher. Während der zweiten Messung war der Abstand zwischen Kopf und Lautsprecher 16m[99]. Der Kopf war auf Achse und erhöht gegenüber dem Lautsprecher.

Abbildung 24 Messpositionen im Audimax (Quelle: Planamt der TU Berlin)

Die Messung der monauralen Raumimpulsantworten

Zur späteren Bestimmung der physikalisch-akustischen Maße der Räume wurden in diesen noch die monauralen Raumimpulsantworten bestimmt. Dies geschah nicht an denselben Tagen wie die Messungen mit FABIAN, aber der Zustand der Säle war jeweils identisch. Dies galt auch für das Setup von Lautsprecher und Mikrofon. Gemessen wurde mit dem EASERA Messsystem der Firma Software Design Ahnert GmbH, Berlin. Dies beinhaltet eine Soundkarte. Die EASERA Software Version war 1.1. Die verwendeten Anregungssignale waren wie bei den binauralen Messungen synthetisierte Sweeps, die bereits in der EASRA Messsoftware als Sweep Samples unterschiedlicher Länge und Wichtung vorliegen. Für die

[98] ca. einfacher Hallradius
[99] ca. vierfacher Hallradius

Messung der monauralen Raumimpulsantworten wurden gewichtete Sweeps genutzt, deren Länge je nach Nachhallzeit des Raumes variierte.[100] Die monauralen Messungen wurden alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt, dies gilt auch für die Messungen im Studio und im Audimax der TU-Berlin. Gemessen wurde mit dem schon vorgestellten Messmikrofon ECM 8000.

4.4. Die Form der BRIR Datensätze bezüglich der räumlichen Auflösung

Wie schon beschrieben, wurden im Rahmen der Untersuchungen in drei der bereits vorgestellten Räume BRIR – Datensätze gemessen. Diese Messungen fanden im Wiener Burgtheater, im Friedrichstadtpalast und im Kammersaal der Universität der Künste in Berlin statt. Die Datensätze des Audimax und des elektronischen Studios entstammen der Datenbank gemessener BRIR Datensätze des Fachbereichs für Audiokommunikation der TU Berlin. Die Datensätze der anderen Räume wurden dieser zur Verfügung gestellt.

Die im Burgtheater gemessenen Datensätze haben eine Auflösung von ±76° in 2°-Schritten auf der horizontalen Ebene und ±36° in 4°-Schritten auf der vertikalen Ebene, allerdings wurde bei den Hörversuchen nur die 0°-Ebene vertikal verwandt. Im Friedrichstadtpalast und im Kammersaal wurden nur die BRIR Sätze mit einer Auflösung im Bereich von ±76° in 2°-Schritten auf der horizontalen Ebene bestimmt. Dadurch konnte die Messzeit in den Räumen erheblich verkürzt werden. Im Gegensatz zum Burgtheater, wo die Messzeit noch ca. sieben Stunden, inklusive Auf- und Abbau, pro Messplatz betrug und die Messung so 2 Nächte in Anspruch nahm, war es so möglich, die binauralen Datensätze für jede der zwei Messpositionen in nur zwei Stunden zu erzeugen. In Hinblick auf noch umfangreichere Messungen mit mehreren Quellen und noch mehr Messpositionen im Raum sollte versucht werden, die Messabläufe von FABIAN weiter zu optimieren um die Messdauer zu verkürzen. Daran wird am Fachgebiet für Audiokommunikation bereits geforscht.

Die aus der Datenbank stammenden BRIR Sätze vom Audimax und Elektronischem Studio weisen ebenfalls eine Auflösung von +-76° in 2°-Schritten auf der horizontalen Ebene auf.

---

[100] *EASERA tutorial Version 1.1*, 2006.

Damit liegen alle 9 BRIR Datensätze in gleicher Auflösung vor. Im Elektronischen Studio der TU wurde nur ein BRIR Satz für eine Messposition (Sitzen am Sweetspot der mehrkanaligen Abhöranlage) gemessen. Für alle anderen Räume liegen je zwei BRIR Sätze (Messpositionen) vor. So kommen bei den Hörversuchen genau neun BRIR Datensätze zur Anwendung.

jeweils ein Raum, 1 Empfänger, nur horizontale Daten +-76° in 2° Schrittten	Abstand vom Sender
BRIR Datensatz 1: Audimax Platz 1	4m
BRIR Datensatz 2: Audimax Platz 2	16m
BRIR Datensatz 3: Burgtheater Platz 1	8,6m
BRIR Datensatz 4: Burgtheater Platz 2	20,8m
BRIR Datensatz 5: Friedrichstadtpalast Platz 1	5,7m
BRIR Datensatz 6: Friedrichstadtpalast Platz 2	16,2m
BRIR Datensatz 7: Kammersaal UdK Platz 1	3m
BRIR Datensatz 8: Kammersaal UdK Platz 2	7,6m
BRIR Datensatz 9: Elektron. Studio	3,3m

Tabelle 4 Die BRIR Datensätze

5. Die Vorstellung der aus den monauralen Raumimpulsantworten zu bestimmenden physikalischen Parameter

Alle im nachfolgenden beschriebenen physikalischen Maße wurden aus den monauralen Raumimpulsantworten ermittelt, die an den 9 Messpunkten in den 5 Räumen gemessenen wurden. Dazu wurde die Software EASERA Version 1.1.3 der Firma SDA genutzt. Einige Maße wurden mit Microsoft Excel berechnet. Zum besseren Verständnis werden die physikalischen Maße, die mit den perzeptiven Daten aus den Hörversuchen korreliert wurden im Folgenden kurz erklärt. Ausführlichere Beschreibungen dieser Maße sind in der angegebenen Fachliteratur nachzulesen.

Zur Bestimmung der meisten physikalischen Maße sollte nach den Messvorgaben eine Kugelschallquelle genutzt werden. Zur Bestimmung des STI sollte ein künstlicher Sprecher zum Einsatz kommen. Für diese Magisterarbeit wurden die Räume mit einem gerichteten Lautsprecher angeregt.

Die Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist das älteste und bekannteste raumakustische Maß.[101] Sie beschreibt die Zeit, in der ein Schallereignis in einem Raum nach dem Abschalten der Schallquelle um 60 dB leiser wird.[102] Die Nachhallzeit wird in Sekunden angegeben.

Formel 2 Nachhallzeit nach Sabine von 1923 Entnommen Weinzierl S.191 abgebildet in leicht abgeänderter Form

$$T = 0{,}163 \frac{V}{A + 4mV}$$

V - Raumvolumen; A - Gesamtabsorbtionsfläche; m - Energiedämpfungskonstante

Die Early Decay Time EDT

Die Early Decay Time oder auch Anfangsnachhallzeit nach Jordan(1980) ist die Zeit bei 10 dB Pegelabfall und wurde im Bereich von 0dB bis -10dB Schallpegelabfall der monauralen Raumimpulsantwort ermittelt. Der mit EASERA bestimmte Wert der EDT wurde mit dem durch Ablesen aus dem EASERA-Plot des Schallpegelabfalls ermittelten Wert abgeglichen.[103] Sie wird in Sekunden angegeben.

Die Schwerpunktzeit

Die Schwerpunktzeit wird auch oft unter als *Center time* bezeichnet. Sie ist ein Maß für den Raumeindruck und die Durchsichtigkeit bei Musik- und Sprachdarbietungen. Die *Center time* (nach Kürer) ist der Schwerpunkt der aufintegrierten Energie. Dieser Zeitpunkt markiert die Zeit, zu der die bereits angekommene Energie der noch nachfolgend eintreffenden Energie

---

[101]Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 188.

[102]Cremer, L. und Möser, M.: *Technische Akustik.* 5.Aufl. Berlin: Springer, 2002. S 169.

[103]Dickreiter, Michael: *Handbuch der Audiotechnik.* 6. Auflage München: Saur Verlag, 1997. S. 33.

entspricht. Sie wird nach der folgenden Formel berechnet:[104] Die *Center time* wird in Millisekunden angegeben.

Formel 3 *Center time* Formel entnommen bei Weinzierl S197

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t \cdot p^2(t)\mathrm{dt}}{\int_0^\infty p^2(t)\mathrm{dt}}$$

t_s *Center time*; t Zeit; p Druck;

Die *Center time* gilt als günstig in einem Bereich von 70-150ms bei 1KHz (1-Oktavbereich) für Musik und bei 60-80ms bei 500-4000Hz (4-Oktavbereich) für Sprache.[105]

Die Risetime

Die Risetime oder auch Einschwingzeit beschreibt die Zeit bis zur Halbierung der Schallleistung der Impulsantwort. Sie wurde mittels eines Mathlab® Scripts ermittelt.[106]
Die Einheit ist die Zeit.

Formel 4 Risetime Formel entnommen Wilkens Lehmann S 261

$$\int_0^{t_r} p^2(t)\mathrm{dt} = \int_t^\infty p^2(t)\mathrm{dt}$$

t_r *Risetime*

---

[104] *EASERA tutorial Version 1.1*, 2006: http://www.sda-softwaredesign.de/easera/dl/EASERATutorial_De.pdf Zugriff am 25.02.2008. S. 126.

[105] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik". In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik*. : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 197.

[106] Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien". In: *ACUSTICA* 45, (1980). S. 261.

Das Bassverhältnis

Das *Bassverhältnis* ist ein Maß für die Klangfarbe des Nachhalls und beschreibt das Verhältnis der Nachhallzeit bei mittleren und tiefen Frequenzen.

Formel 5 *Bassverhältnis* Formel entnommen bei Weinzierl S191

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}}$$

T - frequenzabhängige Nachhallzeit

Günstig ist das *Bassverhältnis* im Bereich von 1,0 bis 1,3 für Musik und im Bereich von 0,8 bis 1,0 für Sprache.[107]

Das Deutlichkeitsmaß für Sprache

C_{50} ist ein Deutlichkeitsmaß für gesprochene oder gesungene Sprache. Die Schallenergie nach dem Eintreffen des Direktschalls innerhalb einer Verzögerungszeit von 50ms gilt als günstig, da sie die Deutlichkeit von Sprache unterstützt, die danach eintreffende Schallenergie ist der Deutlichkeit abträglich.

Formel 6 Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50} Formel entnommen Weinzierl S 192

$$C_{50} = 10\log\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}\,\mathrm{dB}$$

E_{50} *Energie innerhalb der ersten 50ms nach Direktschall*

Das Deutlichkeitsmaß für Sprache wird meist im 4-Oktavbereich zwischen 500 bis 4000Hz bestimmt und in dB angegeben.[108]

---

[107] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik". In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 191.
[108] Vgl. ebenda S. 192.

Das Klarheitsmaß für Musik

C_{80} ist ein Klarheitsmaß für die Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen. Es beschreibt das Verhältnis der Schallenergie nach dem Eintreffen des Direktschalls innerhalb einer Verzögerungszeit von 80ms zur danach folgenden.[109] Dieses Maß wird in dB angegeben.

Formel 7 Klarheitsmaß für Musik C_{80} Formel entnommen Weinzierl S 199

$$C_{80} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \text{dB}$$

E_{80} *Energie innerhalb der ersten 80ms nach Direktschall*

Der Artikulationsverlust für Sprache Al_{cons}

Der Al_{cons}, nach Peutz, ist der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten. Es ist ein Maß für die Sprachverständlichkeit in Räumen und wird beschrieben durch eine empirisch ermittelte Formel als Funktion der Nachhallzeit, des Raumvolumens und des Abstandes zur Schallquelle - r_Q. Bezieht man diese auf den Hallradius - r_H ergibt sich folgende Formel:

Formel 8 Al_{cons} mit Bezug auf den Hallradius Formel entnommen bei Weinzierl S 193

$$Al_{cons} = 0{,}625 \left(\frac{r_Q}{r_H} \right)^2 \cdot T\%$$

Formel 9 Al_{cons} aus der IR , Nachhallenergie im Verhältnis zur Direktschallenergie Formel entnommen bei Weinzierl S 193

$$Al_{cons} = 0{,}625 \left(\frac{E_{\infty} - E_{35}}{E_{35}} \right)^2 \cdot T\%$$

E_{35} *- Direktschallenergie bis 35ms;* E_{∞} *Gesamtenergie*

---

[109] Vgl. ebenda. S. 198.

Der Al_{cons} wird in % angegeben. Ist er kleiner als 3%, gilt er als ideal, bei rund 10% als gut und bei mehr als 15% als unbrauchbar. Lange Nachhallzeiten verschlechtern den Al_{cons}.[110]

Interauraler Kreuzkorrelationskoeffizient *IACC*

Der Interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient wurde mit EASERA aus den biauralen Raumimpulsantwort der jeweiligen Messplätze der 5 Räume für die Richtung 0°/0° bestimmt.

Es wurde die Phasenlage IR des linken und der IR des rechten Ohres verglichen. Bei einem Korrelationsgrad von 1 liegt eine vollständige Korrelation der Signale vor, bei einem Korrelationsgrad von 0 keine. Die interaurale Kreuzkorrelation wurde nach ISO 3382 für die einzelnen Oktavbänder ermittelt, und zwar für die ersten 80ms der Impulsantwort Early, $IACC_E$, für den Teil der Impulsantwort nach 80ms Late, $IACC_L$ sowie für die gesamte Impulsantwort Full. Weiterhin wurde eine Frequenzbewertung durch Mittelung der mittleren Frequenzbänder vorgenommen.

Formel 10 IACF und IACC Formel entnommen aus Weinzierl S 200

$$IACF_{t_1,t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t+\tau)dt}{\left[\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_R(t)dt\right]}$$

$$IACC_{t_1,t_2} = \max\left|IACF_{t_1,t_2}(\tau)\right|$$

$IACF(\tau)$ Interaurarele Kreuzkorrelationsfunktion, $p_L(t)$ IR am linken Ohr, $p_R(t)$ IR am rechten Ohr

Nach Beranek korrespondiert der Wert 1 – $IACC_E$ mit der empfundenen Weite des Höreindrucks, während der Wert 1 – $IACC_L$ mit der empfundenen "Einhüllung" korreliert.

[110] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik". In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 193.

Als maßgebende Größen werden die Oktavbänder 500Hz, 1000Hz und 2000Hz angesehen. Als exzellent bis überragend werden $IACC_E$ – Werte zwischen 0,28 und 0,38 angesehen, als gut bis exzellent $IACC_E$ – Werte zwischen 0,39 und 0,54, als akzeptabel $IACC_E$ – Werte zwischen 0,55 und 0,59. [111] Die für die Korrelation mit den perzeptiven Daten zu bestimmenden IACC Maße waren:

$IACC_{E\,500Hz,1000Hz,2000Hz}$ (early),

$IACC_{F\,500Hz,1000Hz,2000Hz}$ (full),

$IACC_{L\,500Hz,1000Hz,2000Hz}$ (late).

Das Stärkemaß

Das Stärkemaß G, das von Lehmann im Rahmen seiner Untersuchungen entwickelt wurde, beschreibt das Verhältnis der Schallenergie am Messort im Verhältnis zu einer anzugebenden Referenz. Die Referenz wurde nach DIN ISO 3382 im Abstand von 10m zur Schallquelle im Freifeld, im Reflektionsarmen Raum am ITA, gemessen. Das Stärkemaß ist das Maß für die Gesamtverstärkung des abgegebenen Schalls durch den umgebenden Raum im Vergleich zum Freifeld.[112]

Formel 11 Stärkemaß G nach Lehmann

$$G = 10\log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t)\,\mathrm{dt}}{4\pi \frac{s^2}{m^2} \int_0^{\Delta t} p^2(s,t)\,\mathrm{dt}}\ \mathrm{dB}$$

Δt *Dauer des Direktschallimpulses.*

[111] *EASERA tutorial Version 1.1*, 2006. S 135.

[112] *Vgl. ebenda* S 124

Die monauralen Impulsantworten wurden zur Bestimmung des Stärkemaßes mit Hilfe von EASERA normalisiert. Anschließend wurde anhand des mit EASERA bestimmten Abstandes (Lautsprecher-Mikrofon) ein Entfernungsdämpfungsfaktor für jede IR errechnet und die IR dementsprechend im Pegel angepasst. Nun wurde die ebenfalls angepasste IR aus dem RAR in EASERA als Referenz IR zur Bestimmung von G ausgewählt und nun für jede IR der Messpositionen das Stärkemaß ermittelt. Es ist als Einzahlwert über alle Bänder angegeben.

Der Sprachverständlichkeitsindex STI

Das gängige Sprachübertragungsmaß ist der STI (*Speech Transmission Index*). „Das Ermittlungsprinzip des STI stammt aus der Ära der analogen Meßgeräte: Dort werden zur Berechnung des STI die Signale der Frequenzen 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz und 8kHz mit Frequenzen zwischen 0,63Hz und 12,5Hz moduliert (die Signalintensität schwankt dabei zwischen 0% und 100%). Durch Nachhall, Echos oder Geräusche tritt dabei ein Modulationsverlust auf (die Signalintensität am Empfangsort schwankt dann zwischen x% und 100%, weil in den "Ruhepausen" auch Signale auftreten). Das Verhältnis von Modulationsgrad am Hörerplatz zum Modulationsgrad des anregenden Signals ergibt dann die Modulations-Übertragungsfunktion." [113]

Nach einer Frequenzwichtung für männliche oder weibliche Sprache ergibt sich der STI_{male} oder der STI_{female}. Mit EASERA wurden nach Schröder alle Modulationsgrade aus der Impulsantwort abgeleitet. Beide Verfahren (sowohl das analoge Verfahren als auch die Ableitung aus der Impulsantwort) sind in der DIN EN 60268-16 beschrieben. In dieser Norm sind auch die einzelnen Größen definiert.

[113] *EASERA tutorial Version 1.1*, 2006: S. S 105

6. Die Methoden zur Erhebung der perzeptiven Maße

Basierend auf den Untersuchungsmethoden von Wilkens und Lehmann wurde das Versuchsdesign für die hier vorgestellte Magisterarbeit erstellt und neuen Methoden gerecht werdend angepasst. Damit sollten methodische Probleme umgangen werden, die bei Wilkens und Lehmann auftraten. So wurde als Übertragungsverfahren für die Hörversuche die schon beschriebene Wiedergabe durch dynamische Binauralsythese genutzt. Der Einsatz von BRIR Datensätzen verschiedener Räume ermöglichte Hörvergleiche der akustischen Eigenschaften dieser Räume bei Festhaltung aller nichtakustischen Einflüsse. Zur Erhebung der perzeptiven Daten kamen die Repertory Grid Technik (RGT) und das semantische Differenzial zur Anwendung.

6.1. Die RGT Methode

Die Untersuchungsmethode der Repertory Grid Technik wurde auf der Grundlage der Psychologie der persönlichen Konstrukte von George Alexander Kelly[114], einem amerikanischen Psychologen, entwickelt. Die Anwendung der RGT Methode für hörpsychologische Untersuchungen wurde ausführlich von Berg und Rumsey beschrieben.
Anfänglich kam diese Methode vor allem in der klinischen Psychologie und der Psychodiagnostik zum Einsatz. Kelly ging davon aus, dass die psychischen Prozesse einer Person durch ihre Art, Ereignisse zu antizipieren gelenkt würden.[115] Der Mensch antizipiert Erlebnisse und Ereignisse und konstruiert seine Wirklichkeit. Kellys Interesse lag in der Erforschung der Konstrukte, mit denen ein Mensch seine Umgebung wahrnimmt, analysiert, versteht, strukturiert und in ihr zurechtkommt. Diese Konstrukte würden dann an den Erfahrungen validiert oder invalidiert. Ein Konstrukt ist ein verbales Etikett, welches für eine begriffliche Unterscheidung steht, die ein Mensch treffen kann. Es wird in Kontrasten gedacht. So existiert kein Begriff laut ohne eine Vorstellung von leise (Dichotomiesatz). Konstrukte dienen dem Individuum dazu, Ereignisse in der Vorstellung zu replizieren und durch Bestätigung oder Verwerfung dieser eine Realität zu konstruieren (Konstruktionssatz).

---

[114] Kelly George A.: *Die Psychologie der persönlichen Konstrukte.* Paderborn:Junfermann- Verlag, 1986.
[115] Scheer, Jörn W.: „Psychologie der persönlichen Konstrukte und Pepertory Grid-Technik“. In: Schmidt. L.R. (Hg.). *Psychologische Aspekte medizinischer Maßnahmen. Jahrbuch der Psychologie.* Band 7.Heidelberg, Berlin: Spinger, 1992. S. 274.

Diese Konstrukte sind in Systemen mit hierarchischer Struktur organisiert (Organisationssatz). Es existieren mehrere Konstruktionssysteme für verschiedene Bereiche (Fragmentationssatz). Konstrukte sind durch Erfahrungen veränderbar (Erfahrungssatz). Der Mensch ordnet sich selbst Konstruktalternativen zu, wenn eine Präzisierung des Konstruktsystems zu erwarten ist (Wahlsatz). Konstrukte sind von Mensch zu Mensch individuell (Individualitätssatz), aber so ähnlich, dass eine Verständigung zwischen den Menschen möglich bleibt (Ähnlichkeitssatz). Ansonsten wäre keine Verständigung im sozialen Umgang zwischen den Individuen möglich (Sozialitätssatz). Ein Konstrukt hat immer einen begrenzten Anwendungsbereich (Bereichssatz).[116]
Auf der Grundlage seiner Vorstellungen entwickelte Kelly Methoden mit denen sich persönliche Konstrukte erfassen ließen. Besonders bedeutend war hier die RGT.

Die Erhebung der Elemente war der erste Schritt der Untersuchung des Konstruktsystems. Dazu erstellte der Versuchsleiter zusammen mit dem Probanden eine Liste mit den dieser Person wichtigen Elementen. In der Praxis enthielt so eine Liste etwa zehn bis zwanzig Elemente. Im zweiten Schritt wurden die Konstrukte gewonnen. Dabei wurden aus der Menge der Elemente nach Zufall Triaden gebildet.[117] Diese drei Elemente wurden dem Probanden präsentiert, und er hatte die Aufgabe zu überlegen, worin sich zwei der drei Elemente ähnelten und sich darin von dem dritten unterschieden. In der vorliegenden Magisterarbeit waren diese Elemente die verschiedenen Räume, Sitzplätze und Stimuli. Zu diesen Elementen wurden die persönlichen Konstrukte der Probanden ermittelt. Die Konstrukte wurden gemeinsam durch Versuchsleiter und Proband erarbeitet, wobei der Versuchsleiter eine moderierende Rolle einnahm. Im dritten Schritt der RGT bewertete der Proband jedes Element mit Hilfe einer mehrstufigen Skala. Es wurde dabei geprüft, inwieweit jedes Konstrukt auf das Element zutraf, dies erfolgte durch das Bilden eines semantischen Differenzials. Eine Clusteranalyse deckte auf, ob und wie die Konstrukte miteinander verknüpft waren.[118] Um möglichst unterschiedliche Merkmalpaare zu gewinnen, war es nötig möglichst unterschiedliche Personen zu ihren Wahrnehmungen in unterschiedlichen Räumen angeregt durch die unterschiedlichen Stimuli, zu befragen. Je mehr sich das dritte Element

---

[116]Scheer, Jörn W.: „Psychologie der persönlichen Konstrukte und Pepertory Grid-Technik“. In: Schmidt. L.R. (Hg.). *Psychologische Aspekte medizinischer Maßnahmen. Jahrbuch der Psychologie.* Band 7.Heidelberg, Berlin: Spinger, 1992. S 275.
[117]Vgl. ebenda S. 276.
[118]Berg, Rumsey: “Spatial Attribute Identification and Scaling by Repertory Grid Technique and other methods”. In: *16th AES international Conference 1999.*S 54-57.

einer Triade von den beiden anderen Elementen unterschied, desto leichter fiel es den Probanden, Unterschiede oder Gemeinsamkeiten zu benennen und so Konstrukte zu finden.

6.2. Das Semantisches Differenzial

Das semantische Differenzial ist ein Verfahren, das in der Psychologie entwickelt wird, um herauszufinden, welche Vorstellungen Personen mit bestimmten Begriffen oder Sachverhalten verbinden. Es wurde von Charles E. Osgood zur quantitativen Analyse von Wortbedeutungen entwickelt. In der vorliegenden Untersuchung kam es zur Erfassung von Beurteilungen der affektiven Einstellung der Probanden zu den dargebotenen raumakustischen Situationen. Es wurden keine diskreten Fragen gestellt, sondern die Versuchspersonen bewerteten auf mehrstufigen Skalen, wie sie eine bestimmte, in diesem Fall raumakustische, Situation empfanden. Die Probanden bekamen dazu mehrere Eigenschaftspaare (laut–leise, groß-klein, etc.) auf einem Fragebogen (GUI Interface via Laptop) präsentiert. Die bei dieser Magisterarbeit verwendeten Skalen waren stufenlos in einem Bereich von -2 bis +2 zu bewerten. Im Ergebnis entstand ein Polaritätsprofil der Perzeption eines Probanden in einer bestimmten raumakustischen Situation. Mit den Methoden der Korrelationsrechnung und der Hauptkomponentenanalyse lassen sich diese Daten auf wenige Basisdimensionen, so genannte Faktoren reduzieren. [119]

6.3. Der Versuchsaufbau und das Versuchsdesign

Die Hörversuche zum Auffinden der perzeptiven Daten erfolgte in 2 Hörversuchen. Der erste Hörversuch diente zur Erstellung eines Fragebogens mit relevanten bipolaren Merkmalspaaren. Im zweiten Hörversuch wurde anhand dieses Fragebogens über ein semantisches Differenzial die Perzeption von Probanden in diesen Räumen ermittelt.

Der Versuchsaufbau war so konzipiert, dass für jede Versuchsperson derselbe Aufbau und derselbe Ablauf realisiert werden konnte. Dabei wurde ein Hauptaugenmerk auf die

---

[119] Berg, Rumsey: "Spatial Attribute Identification and Scaling by Repertory Grid Technique and other methods". In: *16th AES international Conference 1999*. S 52.

Verarbeitung der Signalkette in Echtzeit gelegt. Latenzen innerhalb der Signalkette wurden technisch auf ein Minimum reduziert und liegen im nicht mehr wahrzunehmenden Bereich.

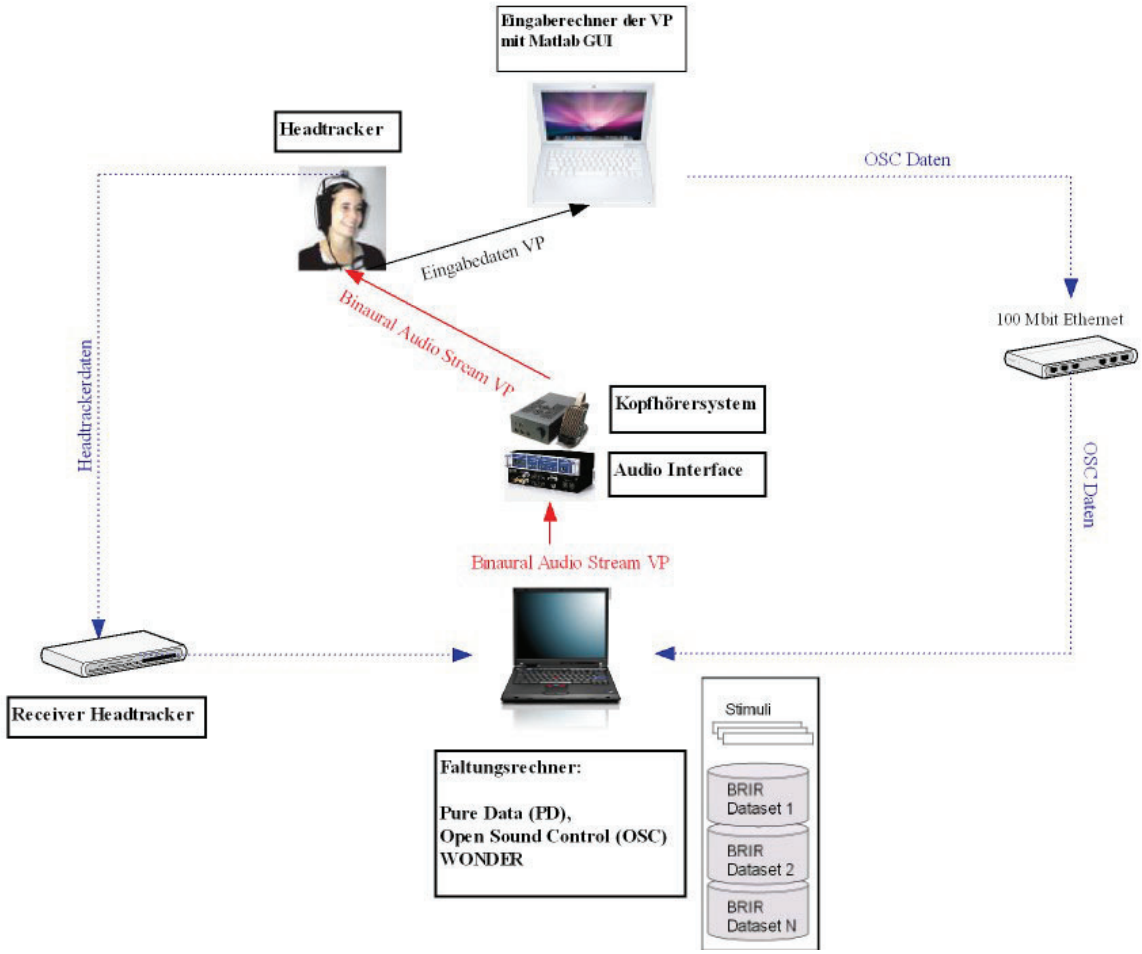


Abbildung 25 Flussdiagramm des Datenstroms aus Audio- und Steuerdaten

Die Signalkette begann mit dem Headtrackersystem, das die Versuchsperson mittig auf dem Köpfhörer montiert trug und endete mit der Ausgabe der Audiodaten via Kopfhörer an die Versuchsperson durch den Faltungsrechner. Um eine möglichst lineare Wiedergabe zu erreichen, wurde ein hochwertiger, offener, elektrostatischer Kopfhörer der Firma STAX genutzt. Die Versuchsperson hatte während des Versuchs die Möglichkeit ihren Kopf in alle Richtungen zu bewegen, durch den Headtracker wurden die Kopfpositionen auf der horizontalen Ebene in einem Bereich von ±76° abgetastet. Vom Faltungsrechner wurden immer die zur aktuellen Kopfposition passenden Audiodaten aus dem Arbeitsspeicher geladen. Alle BRIR-Datensätze der Räume und die Quellsignale wurden hierfür im RAM des Faltungsrechners zeitgleich bereitgehalten. Dies war nötig, um die Signalverarbeitung schnell und die Berechnung der Faltung unhörbar zu machen. Der ausgegebene Audiostrom setzte sich aus einem Quellsignal gefaltet mit der für die aktuelle Kopfposition gemessene BRIR des jeweiligen Raumes zusammen. Die zeitgleiche Bereitstellung der BRIR-Daten und die

logische Verknüpfung der Quellsignale mit diesen Daten wurde in PD realisiert. PD (Pure Data) erhielt die Daten zur Weiterverarbeitung vom Receiver des Headtrackersystems.

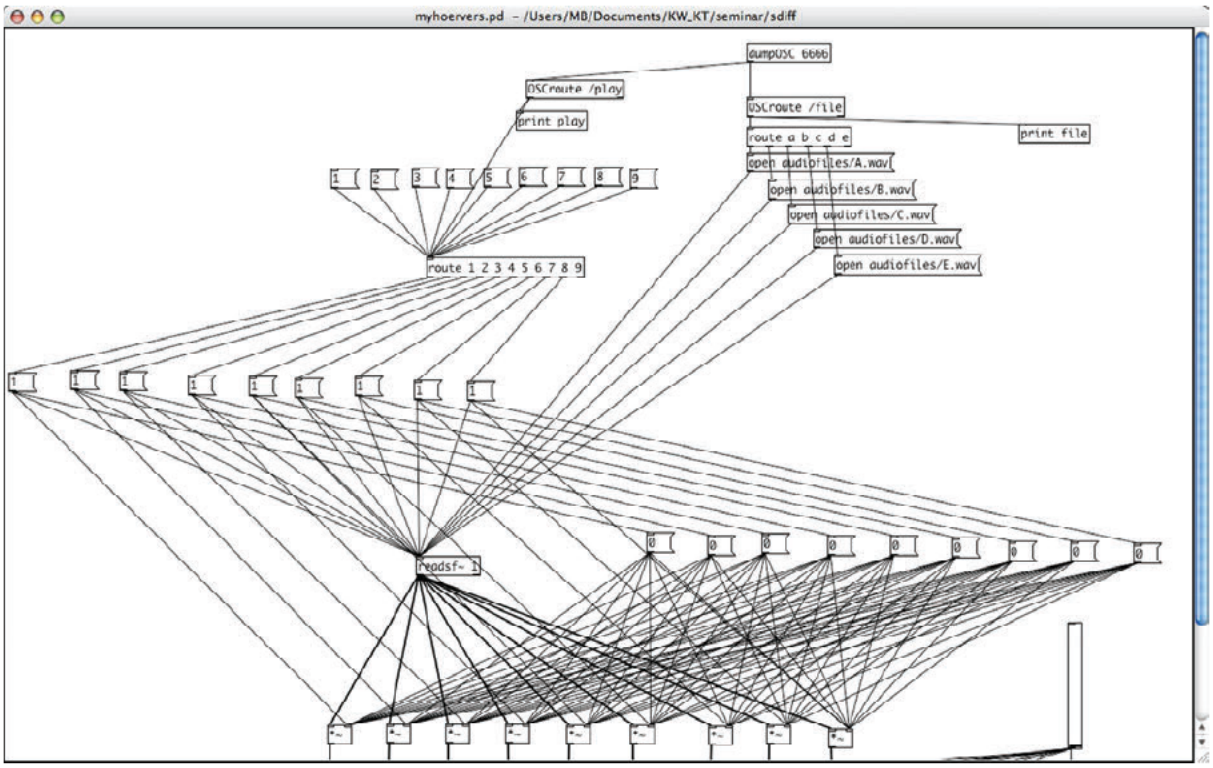


Abbildung 26 Vernetzung der Räume und Quellen in PD (Screenshot)

Dieser erhielt seine Daten wiederum von dem am Kopfhörer befestigten Sender. Aufgabe von PD war es, nach Empfang der Headtrackerdaten, entsprechend der Kopfposition, die passende BRIR aus dem BRIR-Datensatz des jeweiligen Raumes auszuwählen und diese zusammen mit dem für diesen Versuch relevanten Quellsignal an FWONDER weiterzugeben. FWONDER setzte im nächsten Schritt der Signalkette die Faltung des Quellsignals mit der BRIR durch und gab danach die Daten in Form eines Audiostreams über das Audiointerface und die Kopfhörerbasiseinheit am Kopfhörer der Versuchsperson aus. Dies geschah wie schon erwähnt, in Echtzeit. Die Versuchsperson nahm keine Artefakte oder zeitliche Verzögerungen bedingt durch den Faltungsprozess oder andere Abläufe innerhalb der Signalverarbeitungskette war, selbst bei extremen Kopfbewegungen. Eine genaue Aufteilung der BRIR Datensätze wurde bereits im Kapitel 4.4. beschrieben. Drei verschiedene Quellsignale kamen bei den Hörversuchen zum Einsatz.

Stimulus 1	Trompete
Stimulus 2	Sprecherin
Stimulus 3	Streicher

Tabelle 5 Verwendete Quellsignale

6.4. Der Versuchsablauf und die Durchführung des RGT-Hörversuchs

Der Erste Teil des RGT-Versuchs: Das Erheben der Gegensatzpaare

Der erste Hörversuch wurde nach der RGT-Methode durchgeführt. Die zentrale Frage für die Versuchspersonen war hierbei: *„Welches der drei Hörbeispiele unterscheidet sich von den beiden anderen am stärksten? Was macht den Unterschied aus?“* Dafür wurde in Mathlab® das oben dargestellte Eingabeinterface (GUI) pragrammiert. Als Stimulus wurde für alle Durchläufe bei allen Probanden ein etwa zehn Sekunden langes Streichersample genutzt. Der Versuchsperson wurden mit diesem Quellsignal Triaden (A,B,C) von den unterschiedlichen Räumen präsentiert. Es wurden also je 3 BRIR Datensätze zu einer Triade kombiniert. Insgesamt standen so 84 Triaden von BRIR Datensätzen für die Untersuchung zur Verfügung.

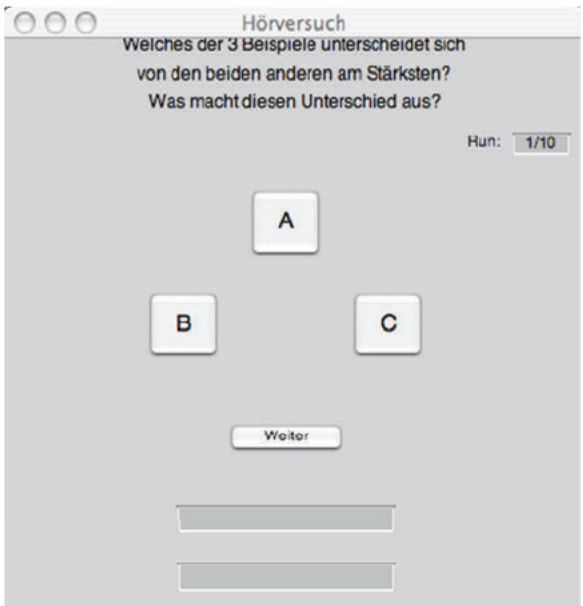


Abbildung 27 Eingabemaske (GUI) in Mathlab für die RGT(Screenshot)

Formel 12 Binominalkoeffizient n über k Tafelwerk S 30

$$\binom{9}{3} = \frac{9!}{3!(9-3)!} = 84$$

Diese Triaden wurden nach zufälliger Verteilung den Probanden präsentiert. Jeder Versuchsteilnehmer hatte maximal 10 Triaden zu bewerten. Der Proband sollte nun ein Merkmalspaar finden, durch welches sich seiner Meinung nach die präsentierten Säle innerhalb einer Triade voneinander unterschieden und dieses in der Eingabemaske eingeben. Nach Bestätigung der Eingabe wurde die nächste Triade zufallsverteilter Räume präsentiert. Nun sollte das nächste Merkmalspaar aufgestellt werden, in dem sich diese Räume unterschieden. Dieser Ablauf wurde so lange wiederholt, bis die Versuchsperson entweder 10

Durchläufe von Triaden erreicht hatte oder für den Versuchsleiter erkennbar wurde, dass der Proband kein weiteres unterscheidendes Merkmalspaar aufstellen konnte. Aufgabe des Versuchsleiters war es, die Versuchsperson moderierend darauf hinzuweisen, wie die Merkmalspaare zu bilden waren und Hilfestellung bei der Findung dieser zu geben. Die Merkmalspaare sollten nicht vom Versuchsleiter vorgegeben werden. Der Versuchsleiter hatte darauf zu achten, dass die Merkmalspaare in sich schlüssig waren und dass nach Möglichkeit keine Überschneidungen oder Doppelnennungen von Merkmalspaaren auftraten.

Am Versuch nahmen 5 Probanden teil, drei von ihnen waren erfahren in der Teilnahme an Hörversuchen, die beiden anderen hatten vorher noch nicht an Hörversuchen teilgenommen. Es war also kein Expertenversuch.

VPN	Alter	Geschlecht	Beruf	Erfahrung
1	23	W	Kamerafrau	Nein
2	26	M	Student KW	Ja
3	25	W	Student KW	Ja
4	28	M	Hartz 4	Nein
5	35	M	Student KW	Ja

Tabelle 6 Zusammensetzung der Versuchsteilnehmer
(KW- Kommunikationswissenschaft / Audiokommunikation)

Folgende Probleme konnten bei der Durchführung dieses Versuchsteils beobachtet werden:

-das Verfahren wurde nicht wirklich als moderiertes Verfahren durchgeführt,

-es kam zu Doppelnennungen von Merkmalpaaren,

-durch die Eingabe der Daten am GUI abgelenkt, fielen die Kopfbewegungen der Probanden sehr gering aus.

Der zweite Teil des RGT-Versuchs: Das Einsetzten der Gegensatzpaare in ein persönliches semantisches Differenzial

Im zweiten Teil des RGT Hörversuchs sollte die Versuchsperson anhand der von ihr im ersten Teil selbst generierten Merkmalspaare eine persönliche Bewertung von Räumen nach diesen eigenen Konstrukten vornehmen. Die Eingabe erfolgte auch dabei wieder über ein in Mathlab® programmiertes GUI. Das GUI bot die Möglichkeit, die Merkmale (construct) in einem stufenlosen Intervall einzustellen und damit zu bewerten. Das Quellsignal für jeden Versuchsteilnehmer wurde zu Beginn der Bewertung zufällig aus den schon vorgestellten Quellsignalen gewählt und war dann über den kompletten Versuchsablauf für diese Versuchsperson dasselbe. Eine Clusteranalyse der Daten aller fünf Versuchsteilnehmer erfolgte bei deren Auswertung. Die Clusteranalyse dient zur Reduktion der Komplexität der erhaltenen Konstrukte.[120] So konnten unterschiedlich benannte Merkmalspaare gefunden werden, die offensichtlich dieselbe Wahrnehmung beschrieben. Diese konnten dann zusammengefasst werden, um so die Anzahl der Konstrukte zu reduzien.

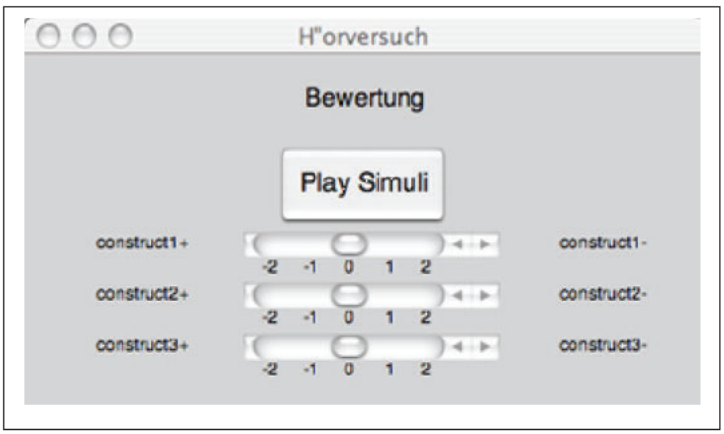


Abbildung 28 Eingabemaske (GUI) in Mathlab für persönliches semantisches Differenzial (Screenshot)

Die Auswertung der Clusteranalyse der RGT

Die statistischen Auswertungen, die im Rahmen dieser Magisterarbeit durchgeführt wurden, erfolgten alle mit der Software SPSS Version 15.0 für Windows. So wurde auch die Clusteranalyse zur Auswertung der RGT mit SPSS geführt. Bei der Clusteranalyse werden Konstrukte miteinander verglichen, dabei wird nach Korrelationen zwischen den Zeilen des Grids gesucht. Die Zeilen mit den höchsten Korrelationen untereinander werden

[120] Scheer, Jörn W.: „Psychologie der persönlichen Konstrukte und Pepertory Grid-Technik". In: Schmidt. L.R. (Hg.). *Psychologische Aspekte medizinischer Maßnahmen. Jahrbuch der Psychologie.* Band 7.Heidelberg, Berlin: Spinger, 1992. S. 277.

nebeneinander neu angeordnet.[121] Zur Anwendung kam, wie schon von Berg und Rumsey beschrieben, die hierarchische agglomerative Clusteranalyse. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in einem Dendogram.[122] Die 5 Dendograme der Versuchspersonen sind im Anhang enthalten als Abbildungen 32, 33, 34, 35 und 36. Die Agglomeration der Merkmale geschah nach Pearson (Korrelationsanalyse), da nach einem Gleichlauf in den Merkmalen (Ähnlickeit zwischen den Merkmalen) gesucht wurde. Im Dendogram liegen Merkmale, die sich sehr ähnlich sind, nah beieinander, und die Clusterabstände sind hier sehr gering. Für jede der fünf Versuchspersonen wurde eine eigene Clusteranalyse der RGT Hörversuchsdaten durchgeführt. Bei der Auswertung mussten die Ergebnisse dann sinnvoll interpretiert werden. Merkmale, die im ersten Teil der RGT von der Versuchsperson mehrfach genannt wurden, konzentrierten sich im Dendogram zu einem Cluster, die Abstände waren sehr gering. Bei der Erstbewertung dieser mehrfach vorkommenden Merkmale erfolgte durch alle Versuchspersonen eine sinnvolle Bewertung. Räumlichkeit und Halligkeit lagen bei VPN 1 und bei VPN 3 sehr nah beieinander, deshalb wurden sie zu einem Merkmal zusammengefasst. Lautstärke und Entfernung wurden von allen VPN als Merkmal genannt.
Es folgt eine Liste der durch die RGT erhaltenen Merkmalspaare:

Merkmalspaar			Kommen auch bei Wilkens vor	Kommen auch bei Hawkes[123] vor
Halligkeit	hallig	trocken	ja	ja
Größe	groß	klein	ja	ja
Diffusität	diffus	direkt	ja	ja
Lautstärke	laut	leise	ja	ja
Distanz	nah	fern	nein	ja
Deutlichkeit	deutlich	undeutlich	ja	nein
Angenehmheit	angenehm	unangenehm	ja	nein
Klarheit	klar	unklar	ja	ja
Höhe(räumlich)	hoch	tief	nein	nein

Tabelle 7 Merkmalpaare, die nach der Clusteranalyse der RGT hervortraten

[121]Berg, Rumsey: "Spatial Attribute Identification and Scaling by Repertory Grid Technique and other methods". In: *16th AES international Conference 1999*. S. 58.
[122]Berg, Rumsey: "In search of the spatial dimensions of reproduced sound". In: *108th AES-Convetion Paris, 2000*. Preprint 5139. S. 6.
[123]Sotriropoulou, A.G. und Hawkes, R.J. und Fleming, D. B.: „Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:I, Multidimensional- Description of Evaluations". In: *ACUSTICA* 81 (1995). S. 6

6.5. Der Zweite Hörversuch

Dieser Hörversuch war der Hauptversuch und wurde mit möglichst 12 Versuchspersonen durchgeführt. Die nach der Auswertung der Ergebnisse dieses Versuchs erhaltenen perzeptiven Daten wurden bei der danach folgenden statistischen Auswertung zum Aufzeigen der Zusammenhänge der perzeptiven Daten mit den physikalischen raumakustischen Maßen der Räume genutzt.

Der erste und schwierigste Schritt bei der Versuchsplanung bestand in der Bildung der bipolaren Gegensatzpaare. Diese wurden durch die schon beschriebene RGT generiert. Alle bei der Clusteranalyse der RGT gefundenen Merkmalpaare wurden für den Fragebogen benutzt. Danach wurden weitere relevante Merkmalspaare nach eingängiger Prüfung der relevanten Fachliteratur dem Fragebogen hinzugefügt. Es wurden auch Merkmalspaare genutzt, die schon bei den Untersuchungen von Wilkens und Lehmann zum Einsatz kamen.[124] Merkmalspaare die üblicherweise für Fragebögen zur Untersuchung der perzeptiven Bewertung von akustischen Situationen im Bereich der Psychoakustik genutzt werden wurden auch noch dem Fragebogen hinzugefügt. Die Hörversuche wurden im Rahmen eines Seminars im Hauptstudium am Fachbereich für Audiokommunikation an der TU- Berlin durchgeführt. Die endgültige Auswahl der Gegensatzpaare erfolgte nach Abstimmung mit Dr. H. J. Maempel (Dozent und wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachbereich) und Prof. Weinzierl (Professor des Fachgebiets) und in einer Diskussion im Rahmen dieses Seminars.

Aufdringlichkeit	aufdringlich	zurückhaltend
Härte	hart	weich
Helligkeit	hell	dunkel

Tabelle 8 Merkmalspaare auf dem Fragebogen die der Untersuchung von Wilkens und Lehmann entstammten

[124] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen". In: *ACUSTICA* 38 (1977), S. 17.

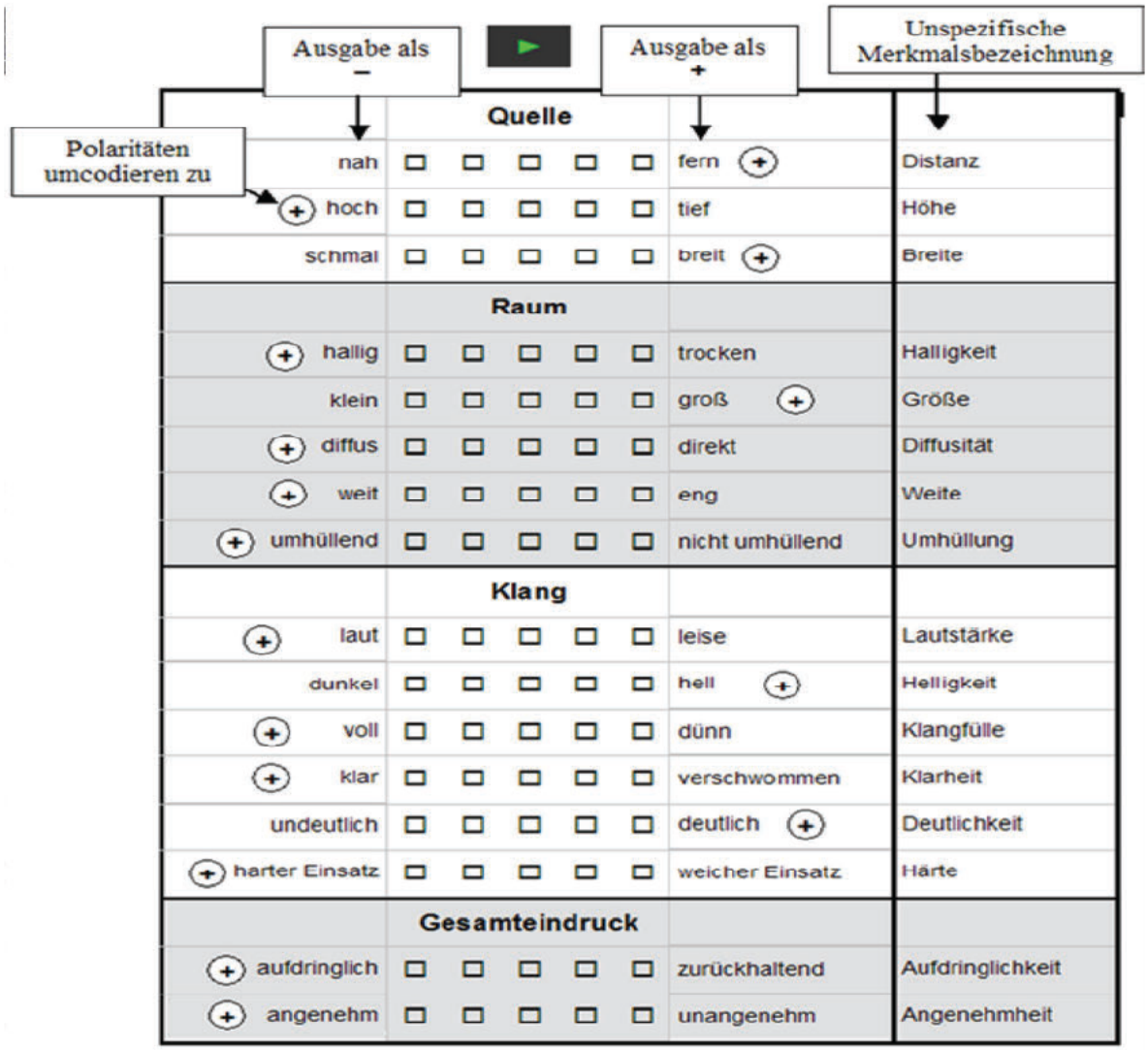


Abbildung 29 endgültiger Fragebogen mit allen Merkmalspaaren, Polaritäten sind sichtbar, Bezug zu Quelle, Raum, Klang oder Gesamteindrucksbezug ist verdeutlicht

Es wurde versucht raumbezogene, klangbezogene, quellenbezogene und gesamteindruckbezogene bipolare Merkmalspaare in den endgültigen Fragebogen aufzunehmen. Damit es bei der Bewertung der Merkmalspaare am Eingabeinterface durch die Versuchteilnehmer, nicht zu einer Urteilstendenz in eine bestimmte Richtung kommt, (nach rechts oder links) sind die Merkmalspaare von ihrer Polarität her unterschiedlich ausgerichtet.

Das endgültige Semantische Differenzial Form ist in Abbildung 29 dargestellt. Nachdem die zu verwendenden 16 Gegensatzpaare nun gefunden waren, wurde ein Mathlab® Eingabeinterface zur Verwendung im zweiten Hörversuch implementiert.

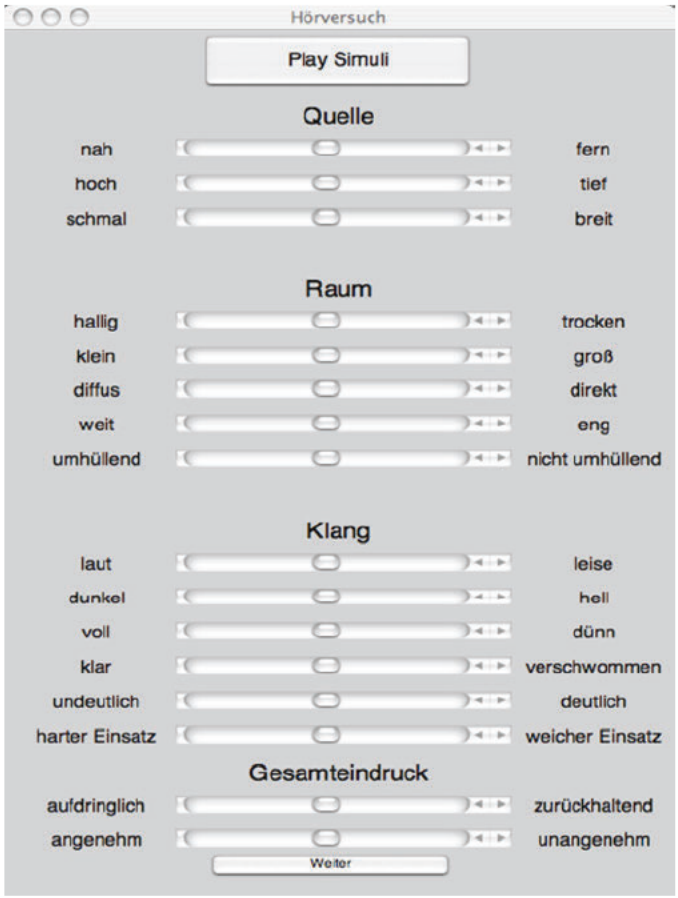


Abbildung 30 Mathlab GUI für den zweiten Hörversuch, Das Semantische Differenzial(Screenshot)

Der Versuchsablauf und die Durchführung des Semantischen-Differenzial-Versuchs

Die Zahl der Versuchsteilnehmer betrug zwölf. Jeder Proband bewertete je 3 Stimuli (Trompete, Streicher, Sprecherin) für alle 9 BRIR Datensätze. Das entsprach 27 Durchläufen. Bei jedem Trail (Durchlauf) wurden 16 Merkmale bewertet. Dabei wurde die Reihenfolge der Stimuli und der BRIR Datensätze zufällig gewählt und war für jede Versuchsperson unterschiedlich.

VP 1	M	30	Student KW	erfahren
VP 2	M	31	Student KW	erfahren
VP 3	W	26	Student KW	erfahren
VP 4	M	22	Kultur und Technik	erfahren
VP 5	W	25	Student KW	erfahren
VP 6	W	34	Psychologie	unerfahren
VP 7	W	25	Student KW	erfahren
VP 8	M	31	Student KW	erfahren
VP 9	M	31	Student KW	erfahren
VP10	W	21	Telefonistin	unerfahren
VP11	M	30	Student KW	erfahren
VP12	M	30	Student KW	erfahren

Tabelle 9 Die Versuchsteilnehmer des zweiten Hörversuchs, Alter, Geschlecht, Beruf Hörversuchserfahrung

Der Versuchsleiter instruierte alle Versuchsteilnehmer mit demselben Text. Besonders wichtig war der Hinweis auf die Bedeutung des Merkmalspaares hoch – tief, welches auf eine Wahrnehmung der räumlichen Höhe des Lautsprechers abzielte (Lokalisation). So konnte eine Fehlinterpretation dieses Merkmals durch die Probanden ausgeschlossen werden. Die Teilnehmer wurden in den Instruktionen auch darauf hingewiesen, dass sie ihr Urteil möglichst spontan fällen sollten. Sie wurden dazu aufgefordert, während des Versuches auch ausgiebig den Kopf zu bewegen. Allerdings waren die Versuchsteilnehmer abermals so auf die Einstellung der Regler am Eingabeinterface konzentriert, dass sie oft vergaßen, den Kopf zu bewegen.

Bei der Bewertung eines Durchlaufs konnte der Stimulus mit entsprechendem BRIR Satz mehrfach gehört werden. Der Versuchsteilnehmer beendete den Durchlauf durch Anklicken des *WEITER* Buttons im Bedieninterface am Laptop. Leider war es auch möglich, den *WEITER* Button zu drücken, ohne alle Merkmalspaare eines Durchlaufs bewertet zu haben. So zeigen sich in der Auswertung der Hörversuchsdaten mehrerer Versuchspersonen Durchläufe, die komplett mit 0 bewertet wurden. Da allerdings nicht zweifelsfrei erkennbar ist, ob es sich um ein Fehleingabe oder eine Bewertung handelt, werden diese Daten mit zur Auswertung herangezogen und nicht als *MISSING* in SPSS markiert. In kommenden Untersuchungen könnte man das Eingabeinterface dahingehend anpassen, dass eine Beendigung eines Durchlaufs erst nach Sicherheitsabfrage (z.B. ‚*Haben Sie alle Merkmalspaare bewertet?*') erfolgen kann.

7. Die Auswertung

Die Auswertung aller pezeptiven Daten erfolgte mit der Statistisoftware SPSS Version 15. SPSS dem Nutzer die Möglichkeit umfangreiche statistische Berechnungen durchzuführen und diese ohne viel Aufwand grafisch aufzubereiten. Die Grundlagen zu den statistischen Verfahren sind jeweils nur kurz angesprochen, können aber in der angegebenen Standardliteratur detailliert nachgelesen werden.

7.1. Die perzeptiven Maße

Die In den Hörversuchen mit Mathlab® ermittelten Daten aller Versuchspersonen wurden mit Hilfe von Microsoft Excel 2003® aufbereitet. Die für SPSS nötige Tabellenstruktur wurde in Excel angelegt und die Daten aus Mathlab® importiert. Die für den Fragebogen vorgenommene Drehung der Polaritäten der bipolaren Merkmalspaare wurde wieder umgekehrt. Dies wurde durch Multiplikation der jeweiligen Werte der Merkmalspaare mit -1 erreicht. Danach wurden die Excel-Daten in SPSS importiert und in der Messwiederholungs-struktur angelegt, Abbildung 37. Dabei durften Nullwerte nicht vorkommen. Nullzeilen wurden aufgespürt und eliminiert.

Distanz	-2 nah	- fern	+2
Höhe	-2 tief	- hoch	+2
Breite	-2 schmal	- breit	+2
Halligkeit	-2 trocken	- hallig	+2
Größe	-2 klein	- groß	+2
Diffusität	-2 direkt	- diffus	+2
Weite	-2 eng	- weit	+2
Umhüllung	-2 nicht umhüllend	- umhüllend	+2
Lautstärke	-2 leise	- laut	+2
Helligkeit	-2 dunkel	- hell	+2
Klangfülle	-2 dünn	- voll	+2
Klarheit	-2 verschwommen	- klar	+2
Deutlichkeit	-2 undeutlich	- deutlich	+2
Härte	-2 weicher Einsatz	- harter Einsatz	+2
Aufdringlichkeit	-2 zurückhaltend	- aufdringlich	+2
Angenehmheit	-2 unangenehm	- angenehm	+2

Tabelle 10 Liste der bipolaren Merkmalspaare nach ihrer ‚Umpolung'

(Leider war es durch das Versuchsdesign möglich, Nullzeilen einzugeben, bei nachfolgenden Untersuchungen sollte dies durch ein angepasstes Versuchdesign ausgeschlossen werden). Nun wurden die Daten in SPSS in die Datenstruktur mit Gruppierungsvariablen[125] (Gruppierungsstruktur) überführt, Abbildung 38. Die Datengrundlage bildeten zwölf Fälle

[125]Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S 27-30.

(Versuchspersonen), die Variablen waren 16 Merkmale, neun BRIR-Sets und drei Quellsignale. Als Gruppierungsvariablen für die BRIR-Sets wurden die fünf Räume und die zwei Hörpositionen hinzugefügt.

Die Bestimmung von Cronbach's Alpha

Cronbach's Alpha wurde ausgehend von der Messwiederholungsstruktur ermittelt, es ist ein Reliabilitätsmaß zur internen Konsistenz der Stichprobe und gibt Auskunft über die Generalisierbarkeit.[126] Datengrundlage waren hier 12 Fälle (Vpn) und folgende Variablen: 16 Merkmale x 9 BRIR-Sets (144 items), über die Quellsignale wurde gemittelt. Der mit SPSS ermittelte Wert von Cronbach's Alpha betrug 0,718. Ein Wert von ≥0,7 gilt als noch befriedigend. Eine größere Stichprobe bei nachfolgenden Untersuchungen könnte hier für ein besseres Ergebnis sorgen.

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
,718	,670	144

Tabelle 11 statistisches Reliabilitätsmaß Cronbach's Alpha (SPSS)

Die Hauptkomponentenanalyse

Die Findung der Faktoren erfolgte über eine Hauptkomponentenanalyse[127] (Principal-Component-Analysis, PCA) mit analytischer Rotation (Rotationmethode-Varimax), einer orthogonale Rotationstechnik.[128] Die Daten lagen hierbei in SPSS in der gruppierten Datenstruktur vor. Bei Durchführung der PCA der perzeptiven Daten traten nach Anwendung des Kaiser-Guttmann-Kriteriums -es wurden nur Faktoren mit einem Eigenwert größer als 1 zugelassen-[129], vier Faktoren zutage. Das Ergebnis des Scree-Test ließ mehr Interpretationsspielraum.

---

[126] Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S. 559.
[127] Vgl. ebenda S. 516-542.
[128] Vgl. ebenda S. 547-554.
[129] Vgl. ebenda. S. 544.

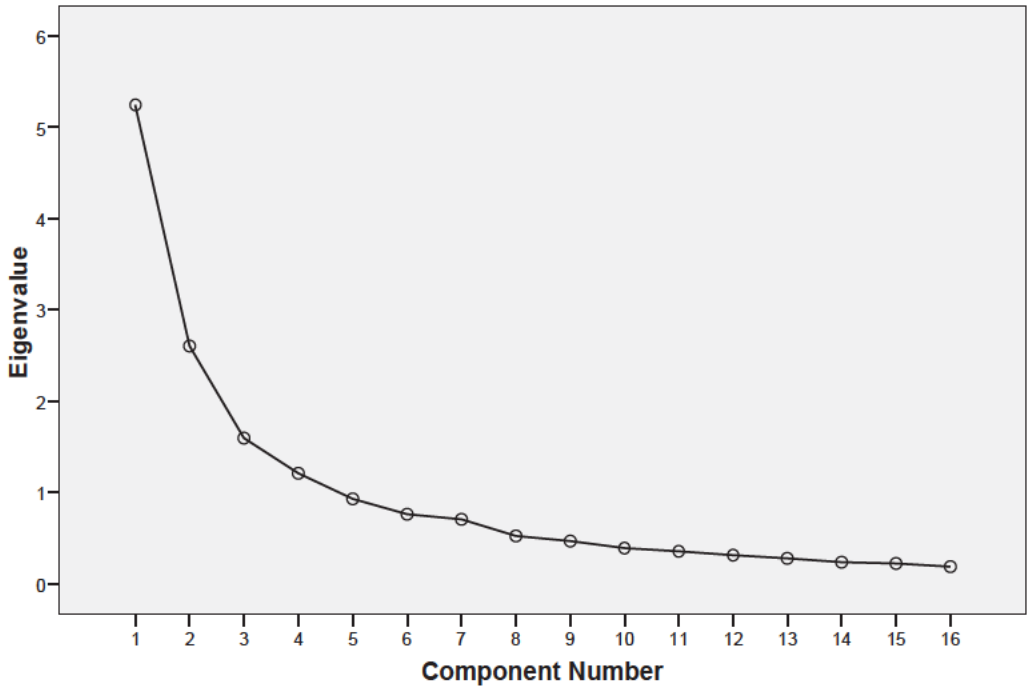


Abbildung 31 Scree Plot erstellt mit SPSS (SPSS)

Da der Knick nicht sonderlich scharf war, konnte man anhand des Scree Testes durchaus bis zu 5 Faktoren einbeziehen. Ab dem 6. Faktor nimmt die aufgeklärte Varianz nur noch geringfügig zu.[130] Nach Auswertung der rotierten Komponenten Matrizen für vier fünf und sechs Faktoren folgte die Entscheidung für die Lösung mit vier Faktoren. Nach ausgiebiger Analyse der zu den Faktoren beitragenden Attribute wurden die Faktoren benannt.

Faktor 1- Empfindung von Räumlichkeit,

Faktor 2- Empfindung von Präsenz,

Faktor 3- Empfindung von Verständlichkeit,

Faktor 4- Empfindung von Helligkeit.

Die zum Faktor Räumlichkeit beitragenden Attribute waren Halligkeit, Größe, Umhüllung, Weite und Diffusität. Die Breite konnte nicht unter diesem Faktor auftauchen, da die Korrelationskoeffizient mit einem Wert von 0,57 nicht signifikant war.

Zum Faktor Präsenz trugen maßgeblich die Attribute Aufdringlichkeit, Lautstärke, Distanz und Härte bei. Dieser Faktor nimmt keinen Bezug auf Präsenz im klanglichen Sinne, sondern Präsenz steht hier als Ausdruck von präsentem Schall. Diese zwei Faktoren fanden sich bei Wilkens in seinem Faktor F1, der die Stärke und Ausdehnung der Schallquelle vereint. Dieser

[130] Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S. 544.

Faktor wurde von Attributen gebildet (Größe, Aufdringlichkeit, Lautstärke, Halligkeit, Stärke), [131] die bei der hier vorliegenden Magisterarbeit in den Faktoren eins und zwei auftauchten.

Der Faktor Verständlichkeit vereinte die Attribute Deutlichkeit, Angenehmheit und Klarheit. Diese Attribute bildeten auch bei Wilkens einen Faktor F2 (Empfindung von Deutlichkeit des Gesamtklanges).[132] Eine gute Verständlichkeit gilt als wichtig für eine angenehme Wahrnehmung. Als vierter Faktor trat die Helligkeit hervor, dies ist das einzige Attribut für diesen Faktor. Bei Wilkens Untersuchungen tauchte die Helligkeit im Faktor drei (Beurteilung des Gesamtklangs bezüglich der Klangfarbe) auf.[133] Außer der Helligkeit gab es im Fragebogen dieser Arbeit, anders als bei Wilkens, keine weiteren Klangfarbenattribute. Eine Anpassung des Fragebogens in diese Richtung scheint für nachfolgende Untersuchungen sinnvoll.

Rotated Component Matrix(a)

	Component Faktoren			
Attribute	1 Räumlichkeit	2 Präsenz	3 Verständlichkeit	4 Helligkeit
Halligkeit	,829	-,209	-,057	,117
Größe	,758	-,302	,010	,123
Umhüllung	,735	,083	,121	-,108
Weite	,729	-,325	-,050	-,058
Diffusität	,682	-,287	-,290	-,080
Aufdringlichkeit	-,124	,861	-,039	,048
Lautstärke	,028	,845	,180	,062
Distanz	,349	-,745	-,174	-,042
Härte	-,345	,662	,116	,140
Deutlichkeit	-,256	,257	,797	,125
Klarheit	-,288	,323	,768	,153
Angenehmheit	,350	-,250	,708	-,008
Helligkeit	-,057	,053	,114	,851
Breite	,566	,199	-,055	-,252
Klangfülle	,338	,465	,479	-,434
Höhe	,034	,371	,058	,476

Tabelle 12 Die Korrelationen der perzeptiven Merkmale mit vier perzeptiven Faktoren (SPSS)

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.
a Rotation converged in 6 iterations.

Diese vier Faktoren erklären 66% der Gesamtvarianz.

---

[131] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen". In: *ACUSTICA* 38 (1977), S. 20.
[132] Vgl. ebenda S 20.
[133] Vgl. ebenda S 20.

Total Variance Explained

Component Faktoren	Initial Eigenvalues, Eigenwerte			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	5,244	32,773	32,773	3,765	23,532	23,532
2	2,603	16,267	49,040	3,408	21,297	44,830
3	1,594	9,960	59,000	2,157	13,484	58,314
4	1,211	7,566	66,565	1,320	8,251	66,565
5	,928	5,799	72,364			
6	,760	4,753	77,117			
7	,703	4,393	81,510			
8	,520	3,249	84,759			
9	,464	2,901	87,661			
10	,388	2,427	90,087			
11	,356	2,226	92,313			
12	,310	1,939	94,253			
13	,279	1,743	95,996			
14	,235	1,467	97,463			
15	,223	1,394	98,856			
16	,183	1,144	100,000			

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Tabelle 13 Eigenwerte und Varianzanteile der Faktoren nach der Hauptkomponentenanalyse (SPSS)

Die Hinzunahme eines weiteren Faktors würde nur 5,8% mehr Aufklärung der Varianz bringen. Dieser Faktor wäre mit Höhe zu benennen, da die Höhe das einzige mit diesem Faktor hoch korrelierende Attribut war. In nachfolgenden Untersuchungen gilt es zu prüfen, ob andere sich auf die Position der Schallquelle beziehende Attribute auch auf diesen fünften Faktor laden würden.

Rotated Component Matrix(a) Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.a Rotation converged in 5 iterations.

Attribute	Component , Faktoren				
	1	2	3	4	5
Halligkeit	,846	-,174	-,061	,115	-,021
Größe	,769	-,283	-,001	,108	,018
Diffusität	,689	-,252	-,303	-,039	-,116
Weite	,733	-,310	-,069	-,051	-,060
Umhüllung	,718	,054	,101	-,193	,094
Aufdringlichkeit	-,114	,889	,003	,024	,006
Lautstärke	,022	,831	,207	-,037	,150
Härte	-,329	,685	,157	,127	,020
Distanz	,389	-,665	-,180	,120	-,339
Deutlichkeit	-,222	,274	,827	,129	-,069
Klarheit	-,262	,326	,797	,129	,001
Angenehmheit	,324	-,340	,671	-,147	,238
Helligkeit	,008	,140	,175	,869	,114
Höhe	-,054	,188	,025	,105	,926
Breite	,561	,209	-,062	-,257	-,098
Klangfülle	,299	,386	,455	-,555	,077

Um den Faktor Helligkeit und einen eventuellen Faktor Höhe besser herauszustellen, sollte die Auswahl der Attribute für einen Fragebogen bei nachfolgenden Untersuchungen dahingehend angepasst werden. Es sollten weitere Attribute gefunden werden, die auf diese Faktoren laden.

Tabelle 14 Die Korrelationen der perzeptiven Merkmale mit fünf perzeptiven Faktoren (SPSS)

Für die Findung der Attribute sollte anders als bei dieser Untersuchung durch eine Befragung mit der vorgestellten RGT Methode bei einer Expertenrunde erfolgen. Um einen stärkeren Knick im Scree-Plot zu erreichen, sollten nachfolgende Untersuchungen mit umfangreicheren Ausgangsdaten und größeren Stichproben stattfinden. Es sollten eine größere Anzahl an BRIR-Datensätzen genutzt werden, mehr Versuchspersonen teilnehmen und der Fragebogen überarbeitet werden.

Die Polaritätsplots der Mittelwertprofile der perzeptiven Merkmale

Die gruppierte Datenstruktur diente hier als Grundlage. Es wurde jeweils nach den Gruppierungsvariablen gemittelt, und so wurden fünf Datensätze in Messwiederholungsstruktur generiert. Diese waren *BRIR-Set x perz. Merkmale, Hörposition x perz. Merkmale, Quellsignal x perz. Merkmale, Raum x perz. Merkmale* und *Versuchsperson x Merkmale.* Aus diesen gemittelten Daten wurden nun die Polaritätsplots erstellt. Der in den Platz dargestellte Wertebereich geht zur besseren Übersichtlichkeit von -1,5 bis +1,5.

Bei genauerer Betrachtung und Vergleich der Plots *Räume x Merkmale, Hörpositionen x Merkmale, BRIR-Sets x Merkmale* und *Quellsignale x Merkmale* zeigten sich die größten Unterschiede in der Merkmalbewertung der Vpn bei den Räumen(Streuung max 2,5[134]), gefolgt von den Abhörpositionen(Streuung max 1). Der Plot *Quellsignale x Merkmale* zeigte nur eine sehr geringe Streuung bei der Merkmalsausprägung von maximal 0,5, was auf einen geringen Einfluß der Quellsignale auf die Urteile der Vpn schließen ließ. Bei Merkmalen des Faktors Räumlichkeit hob sich die Sprecherin von den beiden Instrumentensignalen ab. Genauer werden die Beiträge von *Raum, Hörposition und Quellsignal* zur Urteilvarianz im nächsten Kapitel untersucht. Die Abbildungen der Polaritätsplots befinden sich aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang dieser Arbeit. Siehe Anhang Abbildungen 40-48. Verglich man die Plots der Räume untereinander, zeigte sich, dass die Streuung der Merkmalbewertungen zwischen den Sitzpositionen in den einzelnen Räumen meist nicht größer als 0,5 war. Die Abweichungen schienen für die jeweiligen Positionen, vorn oder hinten, charakteristisch und plausibel. So gab es zum Beispiel Vorn eine höher empfundene Deutlichkeit, oder Hinten eine stärker empfundene Diffusität. Im Friedrichstadtpalast

[134] Bewertungsskala ging von -2 bis 2

unterschieden sich die Profile beider Sitzpositionen am stärksten von allen Räumen. Hier war die zweite Hörposition am stärksten aus der Mittelachse des Lautsprechers versetzt und kaum im Direktschallfeld des Lautsprechers. Abbildungen polarplots der einzelnen Räume Die Streuung der Merkmale beträgt hier max 1. Die Ausprägungen der Merkmale waren auch hier charakteristisch für vorn, einen Platz im Direktschallfeld eines Lautsprechers, und hinten einer Hörposition im Diffusfeld eines Lautsprechers. Vorn: härter, aufdringlicher, lauter, klarer, deutlicher, heller, näher etc. Hinten: diffuser, weiter, umhüllter, größer etc.

Beim Vergleich des Plots der *Räume x Merkmale* stellte sich heraus, dass die Merkmalsausprägungen der einzelnen Räume offensichtlich zu den Nutzungsprofilen dieser passten. So war das Elektronische Studio der trockenste Raum mit der direktesten Schallwahrnehmung. Das Audimax als Raum mit den geringsten schallabsorbierenden Ausbauten war vom Profil her auch der Raum mit der stärksten Halligkeit, Diffusität, Weite und Größe. Das Burgtheater und der Friedrichstadtpalast gleichen sich stark in ihren Profilen. Diese hoben sich auch vom Profil des Kammersaals ab, allerdings waren die Unterschiede hierbei nicht so groß wie die Unterschiede zu den Profilen von Studio und Audimax. Die Merkmalsattribute mit der geringsten Streuung waren die Helligkeit und die räumliche Höhe der Schallquelle. Dies waren bei der im vorigen Kapitel beschriebenen PCA die Faktoren vier und fünf, die am geringsten zur Aufklärung der Gesamtvarianz beitrugen. Diese Erkenntnis untermauerte die Entscheidung für das Modell mit vier Faktoren.

Die Korrelationen der perzeptiven Maße untereinander

Die Korrelationen der perzeptiven Maße untereinander wurden nach der Pearson-Methode[135], der Produkt-Moment-Korrelation, ermittelt.[136] Als Grundlage diente die gruppierte Datenstruktur. Die Prüfung des Signifikanzniveaus erfolgte durch einen zweiseitigen Test.[137] Die Tabelle 19, im Anhang, zeigt die Korrelationen der Merkmale. Signifikante Korrelationen auf 1%-Niveau sind mit zwei Sternen markiert, Korrelationen auf 5%-Signifikanzniveau haben einen Stern. Korrelationen mit einem Korrelationskoeffizienten von über 0.9 wurden

[135]Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S. 203-211.
[136]Vgl. ebenda S. 738.
[137]Vgl. ebenda S. 111-118.

rot markiert, Korrelationen von 0,7 – 0,9 (hoher Zusammenhang)[138] sind orange hinterlegt. Korrelationen mit Werten von unter 0,5 wurden entfernt, diese Werte waren nicht signifikant.

Die Betrachtung der Korrelationstabelle zeigte, dass die Merkmale, die zusammen einen Faktor bilden, untereinander die höchsten Korrelationen (Werte zwischen 0,8-0,9) hatten. Dies zeigte sich sowohl für Umhüllung, Halligkeit, Größe, Diffusität und Weite (Attribute des Faktors Räumlichkeit), als auch für die Attribute der Präsenz: Distanz, Härte, Aufdringlichkeit, Lautstärke. Deutlichkeit und Klarheit waren in ihren Korrelationen auch sehr ähnlich (Faktor Verständlichkeit), die Angenehmheit wies ein davon abweichendes Korrelationsmuster (hohe Korrelationen nur mit Attributen des Faktors Räumlichkeit) auf. Die Korrelationen der Höhe waren nie höher als 0,84 und glichen vom Korrelationsmuster dem des Merkmals Lautstärke. Die Klangfülle korrelierte besonders stark (0,9) mit der Lautstärke. Die Helligkeit korrelierte am geringsten mit anderen Attributen, ca. 0,6 mit Deutlichkeit und Klarheit. Die Breite korrelierte je mit ca. 0,7 mit den Attributen des Faktors Räumlichkeit. Die Korrelationsanalyse der perzeptiven Daten bestätigte die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse.

Die Varianzanalyse der perzeptiven Daten

Mit der Varianzanalyse konnte vor allem die Frage beantwortet werden, ob der größte Einfluss auf die Urteile der Versuchspersonen eher durch den Saal, durch die Hörposition im Saal oder durch den für die Hörversuche genutzten Stimulus hervorgerufen wurde. Zur Anwendung kam die statistische Methode der univariaten Varianzanalyse.[139] Diese wurde in SPSS mehrfach durchgeführt, und zwar für jedes Attribut aufs Neue. Die festen Faktoren waren Raum, Hörposition und Quellsignal, die abhängige Variable jeweils das entsprechende perzeptive Attribut. Die Ergebnisse für jedes Attribut wurden dann in einer, mit EXCEL erstellten, Tabelle zusammengefasst. Die Signifikanzen wurden in den SPSS Ausgabefiles als Zahlenwerte mit angezeigt. In der im Folgenden vorgestellten Tabelle sind die Ergebnisse, die nicht mit 95% signifikant waren, nicht dargestellt, die mit 99% signifikanten Ergebnisse sind

---

[138] Willimczik Klaus: *Statistik im Sport*.4. überarb. Aufl. Hamburg.: Feldhaus Verlag, 1999. S. 75.
[139] Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S. 585- 603.

fett und kursiv eingetragen. Dargestellt sind in der Tabelle die Summen der Abweichungsquadrate geteilt durch die Zahl der Variationsquellen, die Freiheitsgrade.

Varianzen: Summen der Abweichungsquadrate geteilt durch die Anzahl der Freiheitsgrade						
	raum	hoerpos	quellsig	raum * hoerpos	hoerpos * quellsig	raum * hoerpos * quellsig
Faktor 1	***34.12***		2.01			
Halligkeit	38.92		5.99			
Größe	***29.09***			2.79		
Umhüllung	***19.06***			3.06		
Weite	***25.44***	3.20	3.16			
Diffusität	***17.90***		3.38			
Faktor 2	***30.12***	***18.96***				
Aufdringlichkeit	***20.76***	***11.99***		***2.52***		
Lautstärke	***33.39***	***14.78***		***2.23***		
Distanz	***25.06***	***49.45***		***4.08***		
Härte	***10.11***	***8.34***				
Faktor 3	**2.65**	**4.55**				
Deutlichkeit	***5.69***	5.49				
Angenehmheit	***4.15***		3.76			
Klarheit	***7.62***	***12.88***			2.43	1.62
Faktor 4		***7.51***	***8.97***			
Helligkeit			***4.50***			
Breite	7.75	3.55				
Klangfülle	***17.49***	3.30	***3.68***			
Höhe		***8.75***				

Tabelle 15 Varianzen von Raum Hoerposition und Quellsignal (SPSS)

Der größte Teil der Varianz in den Urteilen der zwölf Vpn wurde durch die Räume hervorgerufen. Die wichtigsten Merkmale waren die Halligkeit, die Lautstärke, die Größe, die Weite, und die Umhüllung. Bei Wilkens waren die Urteile zu den Merkmalen Größe, Kräftigkeit, Stärke, und Lautstärke maßgeblich durch den Raum beeinflusst.[140]

Der zweitgrößte Teil der Varianz in den Urteilen der zwölf Vpn wurde durch die Hörposition hervorgerufen. Dies traf zum Teil für die Attribute des Faktors 3 -Verständlichkeit zu (Klarheit und Deutlichkeit). Das deckte sich mit den Ergebnissen von Wilkens, bei dem für die unterschiedlichen Plätze die wesentliche Varianz ebenfalls in den Attributen Deutlichkeit und Klarheit zutage trat.[141]

Die Beurteilung der Distanz von der Schallquelle wurde am stärksten durch die Hörposition beeinflusst. Der Wert war hier doppelt so hoch (50) wie beim Raumeinfluss(25) auf dieses

---

[140] Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen". In: *ACUSTICA* 38 (1977), S. 22.
[141] Vgl. ebenda. S. 22.

Attribut. Das ist ein sehr kausaler Zusammenhang, der in der Realität offensichtlich ist und durch diese Untersuchung noch untermauert wurde.

Die Varianz bei den Urteilen zur Helligkeit, die Streuungen bei den Urteilen der Vpn waren hier nur sehr gering (siehe Polarplots), wurde vor allem durch die Quellsignale beeinflusst. Auch bei Wilkens waren die Gegensatzpaare zur Klangbeurteilung vor allem von den Stimuli beeinflusst. Es wäre interessant zu prüfen, ob in nachfolgenden Untersuchungen mit mehr Attributen der Klangfarbe diese Attribute auch maßgeblich von den Stimuli beeinflusst werden würden.

7.2. Die Auswertung der physikalischen Maße

Im diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung der monauralen Impulsantworten gezeigt. Alle Werte der physikalischen Maße sind in der folgenden Tabelle dargstellt.

Raum Raum	audimax v 1	audimax h 2	burg v 3	burg h 4	palast v 5	palast h 6	kammer v 7	kammer h 8	studio 9
Nachhallzeit [s] T30	1.93	2.00	1.06	1.16	1.04	1.47	1.12	1.23	0.50
EDT [s]	1,5	1,76	0,5	0,64	0,4	1,05	0,8	0,94	0,4
Schwerpunktzeit [ms]	12,35	67,23	14,67	28,49	12,33	62,90	20,55	39,11	16,06
Bassverhältniss	1.20	1.00	0.96	0.98	0.77	1.06	1.18	1.11	0.93
C50 [dB]	12,5	3,1	10,9	6,7	15,7	2,7	8,2	5,1	9,5
C80 [dB]	13,5	4,9	11,9	9,9	16,4	5,0	10,0	6,9	14,4
AlCons [%]	2,0	7,6	2,13	3,46	1,73	5,69	3,568	4,22	2,2
STI	0,82	0,57	0,81	0,72	0,85	0,627	0,71	0,68	0,8
Risetime [ms]	12.44	51.88	22.67	62.38	16.82	70.13	7.95	32.33	10.24
Stärkemaß Mittelwert[dB]	8.79	0.49	7.39	-0.67	2.33	3.21	14.94	6.37	13.49
IACC E 500,1000,2000	0.93	0.70	0.86	0.65	0.97	0.68	0.84	0.34	0.66
IACC L 500,1000,2000	0.14	0.14	0.27	0.21	0.60	0.15	0.25	0.14	0.16
IACC F 500,1000,2000	0.87	0.50	0.76	0.52	0.95	0.50	0.76	0.28	0.63

Tabelle 16 Die Wertetabelle der physikalischen Maße

Die Wertetabelle der physikalischen Maße wurde in SPSS eingefügt. Es gab 9 Fälle (die BRIR-Sets). Um die perzeptiven Daten in SPSS mit den physikalischen zu einem Data-sheet kombinieren zu können, wurden die perzeptiven Daten der Merkmale und die Werte der perzeptiven Faktoren nach den 9 BRIR-Sets gemittelt. Die Versuchspersonen und die Quellsignale wurden herausgemittelt. Die Variablen waren die 4 Faktoren, die 16 perzeptiven Merkmale und die 13 physikalischen Maße. Die physikalischen und die perzeptiven Daten

hatten so dieselbe Zahl der Fälle (BRIR-Sets) und konnten nun beide in dasselbe Datasheet eingefügt werden. Nun konnten die Korrelationen dieser Daten nach Pearson gerechnet werden.Leider war die Zahl der Variablen geringer als die Zahl der Fälle. Bei nachfolgenden Untersuchungen sollte dieses Verhältnis durch die Verwendung von mehr BRIR-Sets (optimal wären mehr BRIR-Sets als Variablen) verbessert werden. Damit wären die Ergebnisse aussagekräftiger.

Die Korrelationen der physikalischen Maße mit den Faktorenwerten

Correlations

		Faktor1 Räumlichkeit	Faktor2 Präsenz	Faktor3 Verständlichkeit	Faktor4 Helligkeit
Nachhallzeit in (s)	pearson correlation	,949**	-,251	-,066	-,072
EDT (s)	pearson correlation	,892**	-,016	,078	-,286
G Stärkemaß	pearson correlation	-,262	,754*	,637	,117
Risetime	pearson correlation	,095	-,780*	-,826**	-,520
C50	pearson correlation	-,139	,262	,352	,800**
IACC F 500,1000,2000	pearson correlation	,032	,142	,204	,814**
IACC E 500,1000,2000	pearson correlation	,154	-,050	,045	,780*
Schwerpunktzeit (ms)	pearson correlation	,357	-,360	-,418	-,751*
STI	pearson correlation	-,346	,232	,286	,730*
C80	pearson correlation	-,358	,341	,315	,698*
AlCons	pearson correlation	,431	-,248	-,271	-,673*
Baßverhältnis	pearson correlation	,042	-,245	,202	,466
IACC L 500,1000,2000	pearson correlation	-,203	-,055	-,017	,524

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabelle 17 Korrelationen der physikalische Maße mit den vier perzeptiven Faktoren (SPSS)

Diese Korrelationsanalyse erfolgte nach Pearson. Die perzeptiven Faktoren wurden in den weiteren Kapiteln immer in den folgenden Farben dargestellt:

-Gelb steht für Faktor 1

-Grün für Faktor 2

-Türkis für Faktor 3

-Lila für Faktor 4.

Es wurden jeweils nur die signifikanten Korrelationen orange und rot hinterlegt. Die Nachhallzeitmaße waren wie erwartet hoch korreliert mit dem Faktor 1 (Räumlichkeit). Das Stärkemaß korrelierte am höchsten mit dem Faktor 2 (Präsenz).

Dies entsprach den Ergebnissen von Lehmann.[142]

[142] Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien“. In: *ACUSTICA* 45, (1980). S 264

Der Faktor 3 (Verständlichkeit) korrelierte am höchsten mit der Risetime. C50, C80, STI, $IACC_{E500Hz,1000Hz,2000Hz}$, $IACC_{F500Hz,1000Hz,2000Hz}$, $IACC_{L500Hz,1000Hz,2000Hz}$[143], AlCons, und Schwerpunktzeit korrelierten am stärksten mit dem Klangfarbenfaktor 4 der sich am meisten im Attribut Helligkeit ausdrückte. Baßverhältnis und IACC L korrelierten hier nur schwach und nicht signifikant. Obwohl Faktor 4 der Faktor mit dem geringsten Anteil an der Aufklärung der Gesamtvarianz der perzeptiven Daten war, korrelierte er mit den meisten physikalischen Maßen. Die Faktoren 1 bis 3 korrelierte jeweils nur mit ein bis zwei Maßen. Dies legte nahe, dass die Auswahl der physikalischen Maße die Perzeption von Hörern in Räumen nur unzureichend beschreibt. Mit Blick auf nachfolgende Untersuchungen sollten andere physikalische Maße gesucht oder neu entwickelt werden, die besser den Höreindruck eines Hörenden in Räumen und Sälen wiedergeben. Klangfarbenmaße und Maße die differenzierter die Räumlichkeit wiederspiegeln als es die Nachhallzeit tat wären könnten da Abhilfe schaffen.

Die Korrelationen der physikalischen Maße untereinander

Die Tabelle mit den Ergebnissen der Korrelationsanalyse der physikalischen Maße befindet sich in Anhang, Tabelle 20. Signifikante Korrelationen mit einem Niveau von 0,05 sind orange markiert, die Korrelationsgrade mit einem Wert von über 0,8 und Signifikanzniveau von 0,01 wurden rot hinterlegt. Die Nachhallzeitmaße EDT und Nachhallzeit, korrelierten stark miteinander.

Der AlCons war mit einem Korrelationsniveau von ca. 0,7 hoch mit EDT korreliert. Das Stärkemaß und die Risetime waren stark untereinander korreliert, allerdings war dieser Zusammenhang umgekehrt. Das Stärkemaß war mit keinem weiteren Maß hoch korreliert.

C50, C80, STI, $IACC_{F500Hz,1000Hz,2000Hz}$, AlCons, Schwerpunktzeit und Riseteime hatten untereinander einen hohen Zusammenhang. Dabei wiesen STI, C50, C80 und $IACC_{F500Hz,1000Hz,2000Hz}$ eine umgekehrte Korrelation auf als Schwerpunktzeit AlCons und Risetime. Der $IACC_{L500Hz,1000Hz,2000Hz}$ korrelierte lediglich mit dem C50, der Zusammenhang

[143] IACC e,l,f gemittelt über bäbder 500Hz, 1000Hz, 2000Hz

war positiv. Der $IACC_{E500Hz,1000Hz,2000Hz}$ korrelierte mit dem $IACC_{F500Hz,1000Hz,2000Hz}$ und dem C50, auch dieser Zusammenhang war positiv.
Die stark untereinander korrelierten Maße tauchen in annähernd derselben Zusammensetzung auch in den im vorigen Kapitel beschriebenen Faktorenmustern auf. Die Auswahl der physikalischen Maße sollte mit Blick auf nachfolgende Untersuchungen überdacht werden und sich von der für diese Arbeit genutzten Zusammenstellung abheben.

Die Korrelation der physikalischen Maße mit den perzeptiven Maßen

Auch diese Produkt-Moment-Korrelation erfolgte nach der Pearsonmethode.[144] Die Tabelle21 ist in im Anhang zu finden. Die Signifikanzniveaus sind in der Abbildung, wie im vorigen Kapitel beschrieben, kenntlich gemacht.

Es bestätigten sich die Ergebnisse aus den vorigen Kapiteln. Die Nachhallzeitmaße, die mit dem Faktor 1 hoch korreliert waren, zeigten dasselbe Verhalten gegenüber den perzeptiven Attributen, welche diesen Faktor bildeten. Das waren Halligkeit, Größe, Umhüllung, Weite und Diffusität. Aber auch die Angenehmheit, die mit zu Faktor 3 beitrug korrelierte hoch mit den Nachhallmaßen wie auch die Breite. Die Korrelationen der EDT (ca.0,8) fielen etwas geringer aus als die der Nachhallzeit (ca. 0,9). Die Zusammenhänge waren jeweils signifikant und positiv. Die Nachhallzeit war wie bei den Untersuchungen von Lehmann negativ mit der Deutlichkeit korreliert.

Das Stärkemaß (Faktor 2) und die Risetime (Faktor 3) korrelierten beide jeweils hoch mit allen Attributen dieser Faktoren (außer der Angenehmheit) und der Höhe. Die Korrelationen des Stärkemaßes waren jeweils positiv, die der Risetime umgekehrt. Die Annahme, dass das Stärkemaß ein Maß für die Lautheit oder Stärke einer akustischen Darbietung ist[145], konnte damit bestätigt werden.

Die Helligkeit korrelierte lediglich mit Werten um 0,7 mit der Risetime (umgekerter Zusammenhang) und C80. Alle anderen Korrelationen waren nicht signifikant.

---

[144]Willimczik Klaus: *Statistik im Sport*.4. überarb. Aufl. Hamburg.: Feldhaus Verlag, 1999. S. 71-79.
[145]Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik*. : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 201.

AlCons und die Schwerpunktzeit korrelierten nur mit dem Attribut Höhe. AlCons gilt als Maß für die Sprachverständlichkeit in Räumen[146], dieser Zusammenhang konnte zwischen AlCons und den perzeptiven Maßen nicht nachgewiesen werden. Die Schwerpunktzeit wies außerdem eine mittlere Korrelation mit der Härte, der Deutlichkeit, der Klarheit und der Helligkeit auf. Die Schwerpunkt gilt als Maß für die Durchsichtigkeit von Sprach und Musikdarbietungen.[147] Dieser Zusammenhang konnte damit bestätigt werden.
Das Baßverhältnis, der IACC L,E,F, C50 und der STI korrelierten nur gering und nicht signifikant mit allen perzeptiven Attributen.

Zusammenfassend Konnte festgestellt werde, dass lediglich die Nachhallzeit, die EDT, das Stärkemaß und die Risetime mit vielen perzeptiven Attributen korrelierten. Die Klangfülle zeigte keine auffälligen Korrelationen mit einem der physikalischen Maße.

Die Multiple Regression und die physikalischen Prädiktoren der perzeptiven Merkmale

Zur Feststellung der physikalischen Prädiktoren[148] zu den vier perzeptiven Faktoren und deren Attributen, kam die multiple Regression[149] In SPSS zur Anwendung. Sie erfolgte schrittweise und vorwärts[150] das heißt, es wurden nur Prädiktoren in das jeweilige Modell aufgenommen, die das Signifikanzkriterium (0,05 Signifikanzniveau) erfüllten.[151]
Der in den Tabellen 22-31 auftauchende Wert B ist dabei der Koeffizient der Regressionsgleichung, Beta der standartisierte Koeffizient der Regressionsgleichung, R der multiple Korrelationskoeffizient und R^2 der quadrierter multipler Korrelationskoeffizient.

---

[146] Vgl. ebenda S. 193.
[147] Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik*. : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 197.
[148] Willimczik Klaus: *Statistik im Sport*.4. überarb. Aufl. Hamburg.: Feldhaus Verlag, 1999. S. 185-193.
[149] Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer,2005. S. 443-456.
[150] Willimczik Klaus: *Statistik im Sport*.4. überarb. Aufl. Hamburg.: Feldhaus Verlag, 1999. S. 188.
[151] Vgl. ebenda S. 196,197.

perzeptive Merkmale	physikalische Prädiktoren	zusätzliche Prädiktoren für Modelle 2, 3, und 4		
	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4
Faktor 1	Nachhallzeit			
Halligkeit	Nachhallzeit	IACC L		
Größe	Nachhallzeit	Baßverhältnis	EDT	
Umhüllung	Nachhallzeit			
Weite	Nachhallzeit	EDT		
Diffusität	Nachhallzeit	EDT		
Faktor 2	Risetime	Stärkemaß		
Aufdringlichkeit	Risetime	C 50	Baßverhältnis	
Läutstärke	Risetime	STI	Baßverhältnis	IACC L
Distanz	Risetime			
Härte	Stärkemaß			
Faktor 3	Risetime			
Deutlichkeit	Risetime	IACC F		
Angenehmheit	Nachhallzeit			
Klarheit	Risetime	IACC E		
Faktor 4	IACC F			
Helligkeit	C80			
Breite	EDT			
Höhe	Risetime	Stärkemaß		
Klangfülle	es konnte kein physikalischer Prädiktor gefunden werden			

Tabelle 18 Physikalische Prädiktoren der perzeptiven Merkmale

Die Ristime zeigte sich als Prädiktor für die Attribute des Faktors 2 und 3 und. Ausnahmen bildeten die Attribute Härte (Stärkemaß war hier der Prädiktor) und Angenehmheit (Prädiktor-Nachhallzeit). Die Nachhallzeit war außerdem Hauptprädiktor für alle Merkmale des Faktors 1.

Das Stärkemaß tauchte trotz hoher Korrelationen mit zahlreichen perzeptiven Merkmalen nur beim Attribut Härte als Prädiktor auf, dies lag an der höheren Korrelation der Risetime mit den anderen Merkmalen. Stärkemaß und Risetime beschrieben dieselben Zusammenhänge, jedoch in umgekehrter Form. Beide Maße zeigten eine hohe Korrelation mit den Merkmalen Aufdringlichkeit, Lautstärke, Härte und Distanz, aber auch Deutlichkeit und Klarheit. Die Auswahl der perzeptiven Merkmale schien die Perzeption eines Hörenden in Räumen nur zu grob beschrieben zu haben. Durch eine differenziertere Auswahl von perzeptiven Merkmalspaaren für einen neuen Fragebogen könnte dem Abhilfe geschaffen werden. Hörversuche mit Expertenrunden könnten dabei helfen dieses Ziel zu realisieren.
Die Helligkeit hatte als Prädiktor das Maß C80. Die Breite wurde am besten durch die EDT beschrieben, zeigte sich schon bei der Auswertung der Korrelationsanalysen. Der Prädiktor für die Höhe war die Risetime. Für die Klangfülle konnte kein geeigneter Prädiktor gefunden werden.

8. Die Zusammenfassung

Gegenstand der Untersuchung war der Zusammenhang der Perzeption von Hörern in binaural simulierten raumakustischen Umgebungen. In komprimierter Form wurde dabei ein Überblick über die zu diesem Thema bereits publizierten Arbeiten gegeben. Aus der Evaluation dieser resultierte die Planung und Durchführung von raumakustischen Messungen, zur Akquise von monauralen und binauralen Impulsantwortdatensätzen, für die Durchführung von zwei Hörversuchen. Dazu wurde das mit dynamischer Binauralsynthese arbeitende Mess- und Wiedergabesystem FABIAN genutzt. Die Messungen fanden in fünf Sälen: Burgtheater Wien, Friedrichstadtpalast, Kammersaal UdK Berlin, Audimax TU Berlin und Elektronisches Studio TU Berlin, an je bis zu zwei Hörpositionen statt: Position eins vorn, Position zwei hinten links. Bei den Hörversuchen wurden drei verschiedene Stimuli genutzt: Trompete, Sprecherin und Streicher. Im ersten Hörversuch (fünf Versuchspersonen) wurde mit der RGT-Methode ein Fragebogen generiert, über den in einem zweiten Hörversuch (semantisches Differenzial) von 12 Versuchsteilnehmern deren perzeptive Bewertungen der neun BRIR-Sets der Säle erfolgte. Aus den monauralen Impulsantworten der Messpositionen der Säle wurde eine Vielzahl von physikalischen raumakustischen Maßen ermittelt. Diese perzeptiven Urteile wurden umfangreichen Statistischen Untersuchungen unterzogen. Dabei wurden die Zusammenhänge der perzeptiven Daten mit den physikalischen Maßen durch Korrelations- und Varianzanalysen aufgedeckt. Es zeigten sich vier Faktoren zu denen sich die 16 im Hörversuch abgefragten perzeptiven Merkmale gruppierten: Räumlichkeit, Präsenz bzgl. Stärke und Lautstärke, Verständlichkeit und als vierter Faktor Helligkeit. Der Zusammenhang mit den physikalischen Maßen zeigte sich wie folgt: Der Faktor Räumlichkeit korrelierte am stärksten mit den Nachhallzeitmaßen, Der Faktor Präsenz mit der Risetime und dem Stärkemaß, der Faktor Verständlichkeit mit der Risetime und die Helligkeit mit den Klarheitsmaßen. Das Baßverhältnis und der $IACC_L$ zeigten keine auffälligen Korrelationen mit irgendeinem perzeptiven Merkmal.

Die aufgezeigten Zusammenhänge deckten sich weitestgehend mit Ergebnissen früherer Untersuchungen, allerdings zeigte sich, dass für nachfolgende Untersuchungen neue perzeptive Merkmale und neue oder andere physikalische Maße gefunden werden müssten um die Zusammenhänge noch präziser beschreiben zu können. Ideal wäre es, wenn ein physikalische Maß mit je nur einem perzeptiven Merkmal hoch korrelieren würde, dann wäre der Zusammenhang nämlich direkt. Die Faktoren ließen sich zwar eindeutig durch je maximal

zwei physikalische Maße beschreiben, die ihrerseits auch hoch miteinander korrelierten, beschreiben, aber für die einzelnen perzeptiven Merkmale war dies nicht der Fall.
Die größte Varianz in den Urteilen der Versuchsteilnehmer wurde durch den Raum erklärt. Die Klangfarbenattribute waren eher durch den Stimulus beeinflusst. Die Attribute der Verständlichkeit wurden von Position im Saal maßgeblich beeinflusst.

Im Ergebnis der Untersuchung zeigten sich methodische Defizite, die es nachfolgenden Untersuchungen zu umgehen gilt.
Die Wahl des Messlautsprechers sollte überdacht werden und ein omnidirektionaler Lautsprecher genutzt werden. Den Messablauf für die Akquise der BRIR-Sets gilt es zu optimieren um die Messzeiten zu verkürzen. Damit wäre einfacher umfangreichere Datensatzakquise möglich. Mehr Messpositionen in späteren Untersuchungen wären empfehlenswert, denn die Stichprobengröße war sowohl für die Untersuchung der perzeptiven Merkmale wie auch der physikalischen Maße annähernd zu klein. Das heißt: mehr Versuchspersonen, mehr Hörversuchsstimuli, mehr Säle und mehr Messpositionen in den Sälen wären sinnvoll. Als Stimuli für weitere Hörversuche dieser Art, wären Claps oder auch Rauschen interessant.
Da nur horizontale Daten in den BRIR-Datensätzen für diese Untersuchung genutzt wurden ist fraglich, und sollte anhand eines dahingehend angepassten Fragebogens geprüft werden, ob die räumliche Wahrnehmung der Höhe der Schallquelle oder ihres seitlichen Versatzes als separater Faktor Position der Schallquelle heraustreten würden bei Nutzung aller Freiheitsgrade von FABIAN bei der Akquise der BRIR-Sets.

9. Literaturverzeichnis

Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter: „Raumakustik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 181-266.

Beranek, L.: *Music, acoustics and architecture,*.New York-London: Wiley & Sons, 1962.

Berg, Rumsey: “In search of the spatial dimensions of reproduced sound”. In: *108th AES-Convetion Paris, 2000*. Preprint 5139.

Berg, Rumsey: “Spatial Attribute Identification and Scaling by Repertory Grid Technique and other methods”. In: *16th AES international Conference 1999*. S. 51-66.

Berg, Rumsey: “Verification and correlation of attributes used for describing the spatial quality of reproduced sound”. In: *19th AES international Conference 2001.* S. 1-19.

Blauert, Jens.: *Räumliches Hören.* Stuttgart: Hirzel Verlag. 1974.

Bortz, Jürgen und Döring, Nicola: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6.,vollst. Überarb. U. akt. Aufl. Berlin et al.: Springer, 2005.

Cremer, L. und Möser, M.: *Technische Akustik.* 5.Aufl. Berlin: Springer, 2002.

Dermutz, Klaus: *Das Burgtheater 1955-2005.* Wien: Zsolnay Verlag. 2005.

Dickreiter, Michael: *Handbuch der Audiotechnik.* 6. Auflage München: Saur Verlag, 1997.

Gottlob, D.: *Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen.* Diss. Göttingen: Universität, 1973.

Grimm, Bärbel: *Tafelwerk.*1.Auflage Leipzig: Interdruck,1994.

Gutachten der Firma BBM zur *Raumakustik des Friedrichstadtpalast*. Berlin: 2005.
Hawkes, R. J. und Douglas, H.: „Subjective acoustic experience in concert auditoria“. In: *ACUSTICA* 24, (1971), S.235

Kaufmann-Fressner: *Das Burgtheater.* Wien: Folio Verlag. 2005.

Kelly George A.: *Die Psychologie der persönlichen Konstrukte.* Paderborn:Junfermann-Verlag, 1986.

Kittiphong, Meesawat: “The time when the reverberation tail in a binaural room impulse response begins”. In: *115th AES Convention, New York, 2003.* Preprint 5859.

Kuhl, W.: „Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios“. In: *ACUSTICA* 4 (1954). S. 618.

Lehmann, P. und Wilkens, H.: „Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien“. In: *ACUSTICA* 45, (1980). S 256- 268.

Lindau, A.: *Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden*. Magisterarbeit Berlin: Technische Universität 2006.

Lindau, Alexander und Hohn, Torben und Weinzierl, Stefan: “Binaural Resynthesis for comparative studies of acoustical environments”. In: *122th AES Convention, Vienna, 2007.* Preprint 7032.

Moldrzyk, Christoph ;Ahnert, W.; Feistel, S. und Lentz, T. und Weinzierl, S.: “Head-Tracked Auralization of Acoustical Simulation” . In: *117th AES Convention, San Francisco, 2004.* Preprint.

Møller, H.:“Fundamentals of binaural technology“, *Applied Acoustics*. 36, No. ¾. 1992. S. 171-218.

Müller, Swen: „Messtechnik“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 1087-1170.
Parkin, P.H. und Scholes, W. E. und Derbyshire, A.C., : „The reverbation times of ten British concert halls“. In: *ACUSTICA* 2 (1952). S. 97.

Scheer, Jörn W.: „Psychologie der persönlichen Konstrukte und Pepertory Grid-Technik“. In: Schmidt. L.R. (Hg.). *Psychologische Aspekte medizinischer Maßnahmen. Jahrbuch der Psychologie.* Band 7.Heidelberg, Berlin: Spinger, 1992. S.273-290.

Schmidt, Bernd: *Programm zu "Sommer-Revue"*, Berlin: Friedrichstadtpalast, 2008.

Siebrasse, K. G.: *Vergleichende subjective Untersuchung zur Akustik von Konzertsälen.* Diss. Göttingen: Universität, (1973).

Slavik ,Karl M. und Weinzierl, Stefan: „Wiedergabeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 609-686.

Sommerville, T.: “Subjective comparisons of concert Hall”. *BBC qurat.*8 (1953). S. 125.

Sotriropoulou, A.G, Fleming, D. B.: “Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert-Goers:II, Physical Room Acoustic Criteria Subjectively Significant”. In: *ACUSTICA* 81 (1995).S.10-19.

Sotriropoulou, A.G. und Hawkes, R.J. und Fleming, D. B.: „Concert Hall Acoutic Evaluations by Ordanary Concert- Goers:I, Multidimensional- Description of Evaluations”. In: *ACUSTICA* 81 (1995). S. 1 – 9.

Webers, Johannes: *Handbuch de Tonstudiotechnik.* : 8.Auflage. Poing: Franzis’Verlag, 2003.

Weinzierl, Stefan: „Aufnahmeverfahren“. In: Weinzierl, Stefan (Hg): *Handbuch der Audiotechnik.* : Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. S. 551-608.

Wilkens, H. und Bünning, H.: „Vergleich der subjektiveb Beurteilung von Lautsprechern aus Paarvergleichen und Einzelbeurteilungen. In: *DAGA Bochun 1978,* Berichtsheft VDE Verlag. Berlin. S. 587.

Wilkens, H.: „Kopfbezügliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung verschiedener Raumeindrücke“. In: *ACUSTICA* 26 (1972), S.214 – 221.

Wilkens, H.: „Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen“. In: *ACUSTICA* 38 (1977), S.10 – 23.

Willimczik Klaus: *Statistik im Sport*.4. überarb. Aufl. Hamburg.: Feldhaus Verlag, 1999.

Winckel, F.: „Die besten Konzertsäle der Welt“. *Baukunst und Werkform 8* (1955), S 751.

Yamagushi, K.: „Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics”. In: *J. Acout. Soc. Amer. 52 1972.* S.1271.

Yoshida, T.:“Psychometric approach to romm acoustics“. In: *5th ICA Liège, 1965.* B18.

Internetquellen

Datenblatt BEHRINGER ECM 8000, Version 1.2. 2000:
http://www.behringerdownload.de/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf
Zugriff am 22.02.2008.

Datenblatt DPA-4060 :
http://www.dpamicrophones.com/en/products.aspx?c=Item&category=128&item=24035
Zugriff am 26.02.2009.

Datenblatt für UPL-1 des Herstellers Meyer Sound, 1995: S1-4.
http://www.meyersound.com/products/legacy/discontinued/upl-1/pdfs/upl-x_oi.pdf
Zugriff am 5.3.2009

EASERA tutorial Version 1.1, 2006:
http://www.sda-softwaredesign.de/easera/dl/EASERATutorial_De.pdf Zugriff am 25.02.2008

Informationen zu Jack audio: www.jackaudio.org Zugriff am 15.03.2009.

Informationen zum Audimax der Technischen Universität Berlin:
http://www.tu-berlin.de/abz/menue/protokoll/veranstaltungsorte/auditorium maximum _ /
Zugriff am 20.01.2009.

Informationen zum Burgtheater:
www.Burgtheater.at Zugriff am 1.2.2009.

Informationen zum Elektronischen Studio der Technischen Universität Berlin:
http://www.ak.tu-berlin.de/menue/elektronisches_studio/ . Zugriff am 20.01.2009.

Informationen zum Friedrichstadtpalast:
http://www.friedrichstadtpalast.de/040000_informationen.asp Zugriff am 24.01.2009.

Informationen zum Kammersaal der Universität der Künste Berlin:
http://www.udk-berlin.de/sites/content/themen/service/vermietungen/konzertsaele/vermietung_kammersaal/index_ger.html Zugriff am 20.01.2009.

Technische Daten zum Burgtheater:
Technische Daten der Burgtheaterbühne, Waagner-Biro, pdf-Datei Zugriff am 28.01.2009.

Zitierte Normen

ISO (D) 3382. 2007.

10. Anhang

Cluster VPN_1

Dendrogram

```
* * * * * * H I E R A R C H I C A L   C L U S T E R   A N A L Y S I S * * * * * *

 Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

                         Rescaled Distance Cluster Combine

   C A S E        0         5        10        15        20        25
 Label     Num   +---------+---------+---------+---------+---------+

 Hall1       1   ─┐
 Hall2       2   ─┘
 Höhe        6   ─┘
 Hall3       7   ─┐
 Räumlich   10   ─┘
 Entfern1    4   ─┐
 Entfern2    8   ─┘
 Lautst1     3   ─┘
 Klang       5   ─┐
 Klang2      9   ─┘
```

Abbildung 32 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 1(SPSS)

Cluster VPN_2

Dendrogram

```
* * * * * * H I E R A R C H I C A L   C L U S T E R   A N A L Y S I S * * * * * *

 Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

                         Rescaled Distance Cluster Combine

   C A S E        0         5        10        15        20        25
 Label     Num   +---------+---------+---------+---------+---------+

 Lautst3     5   ─┐
 Lautst5    10   ─┼─┐
 Lautst4     7   ─┘ │
 Lautst2     2   ─┐ │
 Spitzigk    8   ─┼─┐
 Klarhe_1    3   ─┘ │
 Angenehm    6   ─┘
 klang3      4   ─┐
 Fülle       9   ─┼─┐
 Klarheit    1   ─┘ │
```

Abbildung 33 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 2(SPSS)

Cluster VPN_3

Dendrogram

```
* * * * * * H I E R A R C H I C A L  C L U S T E R  A N A L Y S I S * * * * * *

 Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

                         Rescaled Distance Cluster Combine

   C A S E      0         5        10        15        20        25
  Label     Num  +---------+---------+---------+---------+---------+

  Entfern4    6  ─┐─────────────────────────────────┐
  Hall5      10  ─┘                                 │─────────────┐
  Hall_4      2  ─┐─────────────┐                   │             │
  räumlich    3  ─┘             │─────────────┐─────┘             │
  Entfern3    1  ─────────┐     │             │                   │
  Lautst6     4  ─────────┘─────┘             │                   │
  Diffusit    8  ─────────────────────────────┘                   │
  Hall4       5  ─────────────────────────┐                       │
  Deutlich    7  ─────────────────────────┘─────────────────────┐ │
  Spektral    9  ─────────────────────────────────────────────┘ │
```

Abbildung 34 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 3(SPSS)

Cluster VPN_4

Dendrogram

```
* * * * * * H I E R A R C H I C A L  C L U S T E R  A N A L Y S I S * * * * * *

 Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

                         Rescaled Distance Cluster Combine

   C A S E      0         5        10        15        20        25
  Label     Num  +---------+---------+---------+---------+---------+

  Lautst7     1  ─┐─────────────┐
  Hall7      10  ─┘             │─────────────────────────┐
  Höhe2       4  ─────────────┘                           │
  Lautst10    8  ─────────────────────────────────────────┤
  Lautst11    9  ─────────────────────────────────────────┤
  Lautst9     6  ─────────────────────────────────────────┤─────────┐
  entfern6    7  ─────────────────────────────────────────┤         │
  Lautst8     3  ─────────────────────────────────────────┘         │
  Hall6       2  ─────────────────────────────────────────────────┐ │
  entfern5    5  ─────────┐                                         │
```

Abbildung 35 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 4(SPSS)

Cluster VPN_5

Dendrogram

```
* * * * * * H I E R A R C H I C A L   C L U S T E R   A N A L Y S I S * * * * * *

 Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)

                         Rescaled Distance Cluster Combine

   C A S E        0         5        10        15        20        25
 Label      Num   +---------+---------+---------+---------+---------+

 Groesse      3   ────────────────────┐
 Lautst12     4   ────────────────────┘                   ──────────────────────┐
 Raumante     5   ────────────────────────────────────────┘                     │
 Nähe         2   ──────────────┐                                               │
 Hall9        6   ──────────────┘                         ──────────────────────┘
 Hall8        1   ──────────────────────────────────────┘
```

Abbildung 36 Dendogramm der Clusteranalyse für VPN 5(SPSS)

data_bereinigt.sav [DataSet2] - SPSS Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Graphs Utilities Window Help

1 : VAR00001 | 1,0352 | Visible: 432 of 432 Varia

	VAR00001	VAR00002	VAR00003	VAR00004	VAR00005	VAR00006	VAR00007	VAR00008	VAR00009	VAR00010	VAR00011	VAR00012	VAR00013
1	1,04	,47	-,55	-1,06	1,70	-,81	-1,26	-,95	,00	,65	-,55	-,55	,51
2	-1,16	-1,26	,67	-1,32	,89	-,89	,65	-,75	-1,24	,75	-1,16	-1,10	,61
3	1,42	-,47	,57	-1,90	1,86	-1,06	-1,50	-,79	-,51	1,78	-,61	-,85	,65
4	,67	,00	,95	-2,00	,75	-,39	-,55	-,53	,53	-,51	-,53	-,57	,69
5	-,59	-,33	,63	-,45	,49	-,71	-,81	-,75	-1,06	1,02	,57	-1,04	,93
6	-,53	-,41	,51	-,33	,55	-,47	-,63	-,71	-,79	-,59	-,65	,43	-,37
7	,29	-,27	,53	-1,64	1,30	-,47	-1,28	-,77	-,37	,39	-,73	,63	-,49
8	1,10	-1,18	-1,18	-1,40	1,08	-1,12	-1,18	-1,06	,87	,87	,85	-,61	1,14
9	-1,58	,00	,33	-1,66	1,22	,77	-1,20	-,85	-,47	,65	-,47	,00	,53
10	-,47	-1,16	,00	-1,52	,99	-,49	-,91	-,57	-1,10	,53	-,65	,65	,59
11	1,20	-,35	,69	-1,14	,97	-,47	-,85	-,67	,21	,39	-,69	,59	,39
12	-1,36	,00	,00	-1,76	1,20	1,50	-1,06	-1,48	-,73	1,04	-,43	-,51	,71

Data View / Variable View

SPSS Processor is ready

Abbildung 37 Daten in SPSS in der Messwiederholungsstruktur(SPSS)

sdiff_grouped_data KURZE LABELS.sav [DataSet3] - SPSS Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Graphs Utilities Window Help

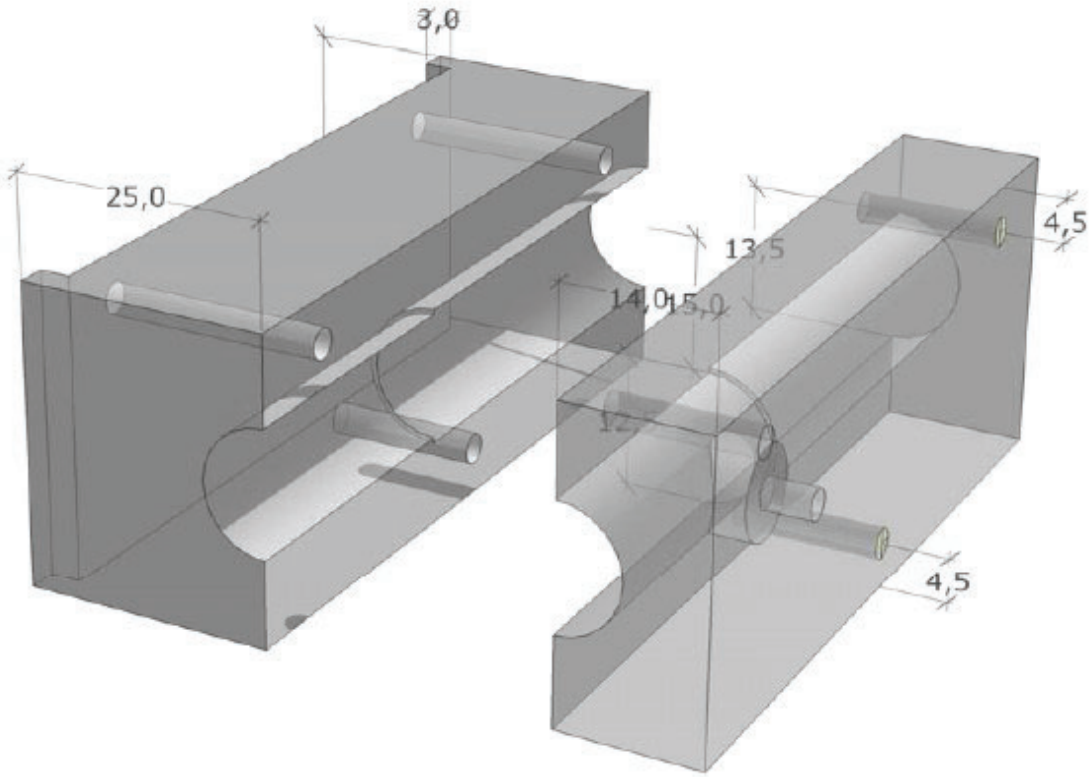
1 : vp | 1 | Visible: 21 of 21 Variabl

	vp	raum	hoerpos	brir_set	quellsig	distanz	hoehe	breite	halligk	groesse	diffusit	weite	umf
1	1	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	1,04	-,47	-,55	1,06	1,70	,81	1,26	
2	2	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-1,16	1,26	,67	1,32	,89	,89	-,65	
3	3	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	1,42	,47	,57	1,90	1,86	1,06	1,50	
4	4	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	,67	,00	,95	2,00	,75	,39	,55	
5	5	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-,59	,33	,63	,45	,49	,71	,81	
6	6	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-,53	,41	,51	,33	,55	,47	,63	
7	7	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	,29	,27	,53	1,64	1,30	,47	1,28	
8	8	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	1,10	1,18	-1,18	1,40	1,08	1,12	1,18	
9	9	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-1,58	,00	,33	1,66	1,22	-,77	1,20	
10	10	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-,47	1,16	,00	1,52	,99	,49	,91	
11	11	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	1,20	,35	,69	1,14	,97	,47	,85	
12	12	Audimax	vorne	Audimax vorn	Streicher	-1,36	,00	,00	1,76	1,20	-1,50	1,06	
13	1	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	2,00	1,66	1,44	1,78	2,00	2,00	2,00	
14	2	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	,97	-,87	,95	1,40	,77	1,26	,77	
15	3	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,02	-,49	-1,32	1,14	1,48	-,45	1,52	
16	4	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,36	-1,02	1,04	1,18	1,62	,97	1,22	
17	5	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,46	-1,30	,71	1,56	1,18	,85	,55	
18	6	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	,87	-,57	,69	,69	,55	-,63	,91	
19	7	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,04	,73	,83	1,18	1,38	,79	1,04	
20	8	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	-,75	,83	-,67	,31	-,65	-,59	-,43	
21	9	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,74	,00	-,59	1,86	1,72	1,26	,99	
22	10	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	-1,54	,45	-,29	-,47	-,89	-1,72	-1,08	
23	11	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,18	,00	,97	1,82	1,56	1,72	1,14	
24	12	Audimax	hinten	Audimax hinten	Streicher	1,40	-1,52	,87	2,00	1,96	2,00	2,00	
25	1	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	,00	,71	,85	,51	,59	,55	,59	
26	2	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	,55	,65	-1,04	,57	-,83	-,93	-1,14	
27	3	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	1,54	-,01	-1,06	,53	,43	-,53	,75	
28	4	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	-1,58	,49	-,71	-1,18	-1,30	-1,30	-1,38	
29	5	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	,00	,59	-,59	-,57	-1,02	-,39	-1,10	
30	6	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	,59	,43	,00	-,71	-,87	,00	1,12	
31	7	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	-1,12	,85	,91	,71	,65	-,23	-,35	
32	8	Burgtheater	vorne	Burg vorn	Streicher	1,72	,85	-1,30	1,48	1,18	1,22	1,14	

Data View / Variable View

SPSS Processor is ready

Abbildung 38 Datenstruktur mit Gruppierungsvariablen(SPSS)



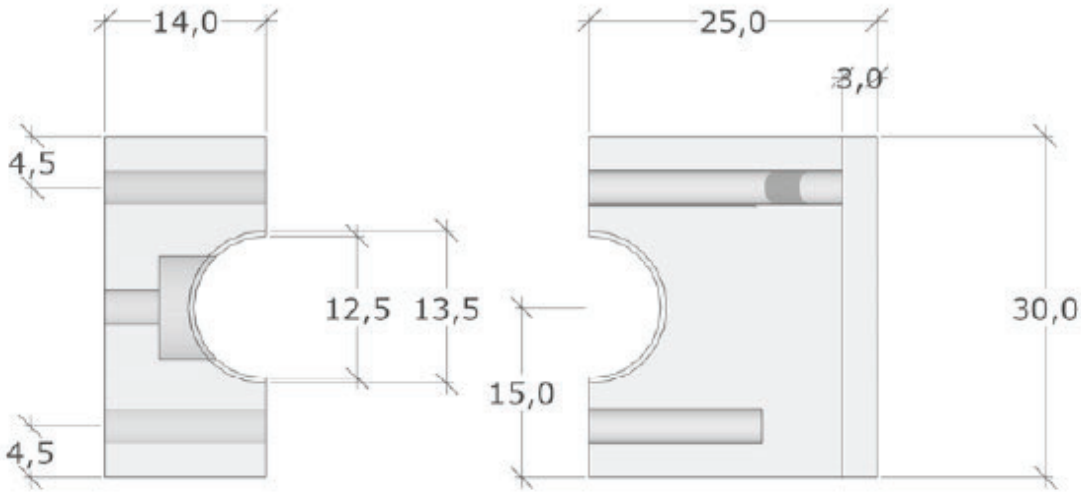


Abbildung 39 Technische Zeichnung und 3D Ansicht der Laserpointerzieleinrichtung

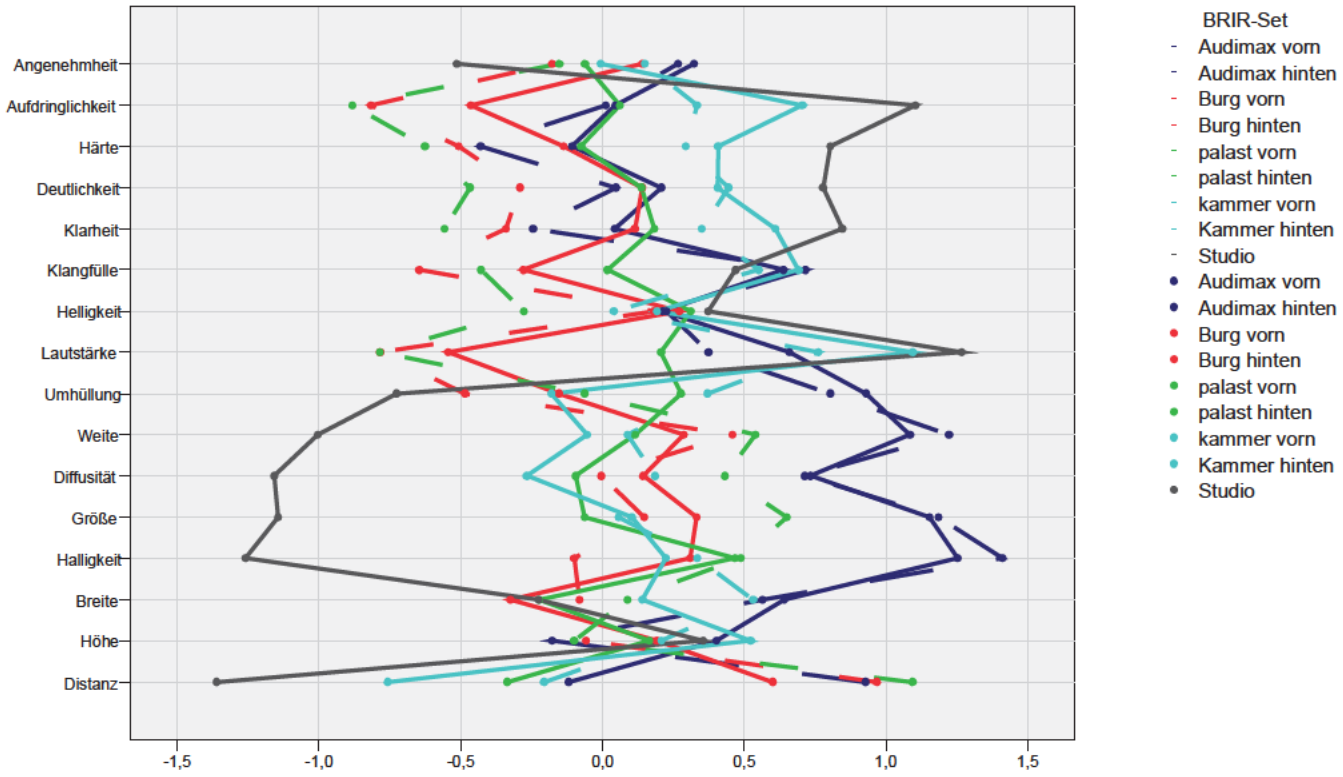


Abbildung 40 BRIR-Det x Merkmal(SPSS)

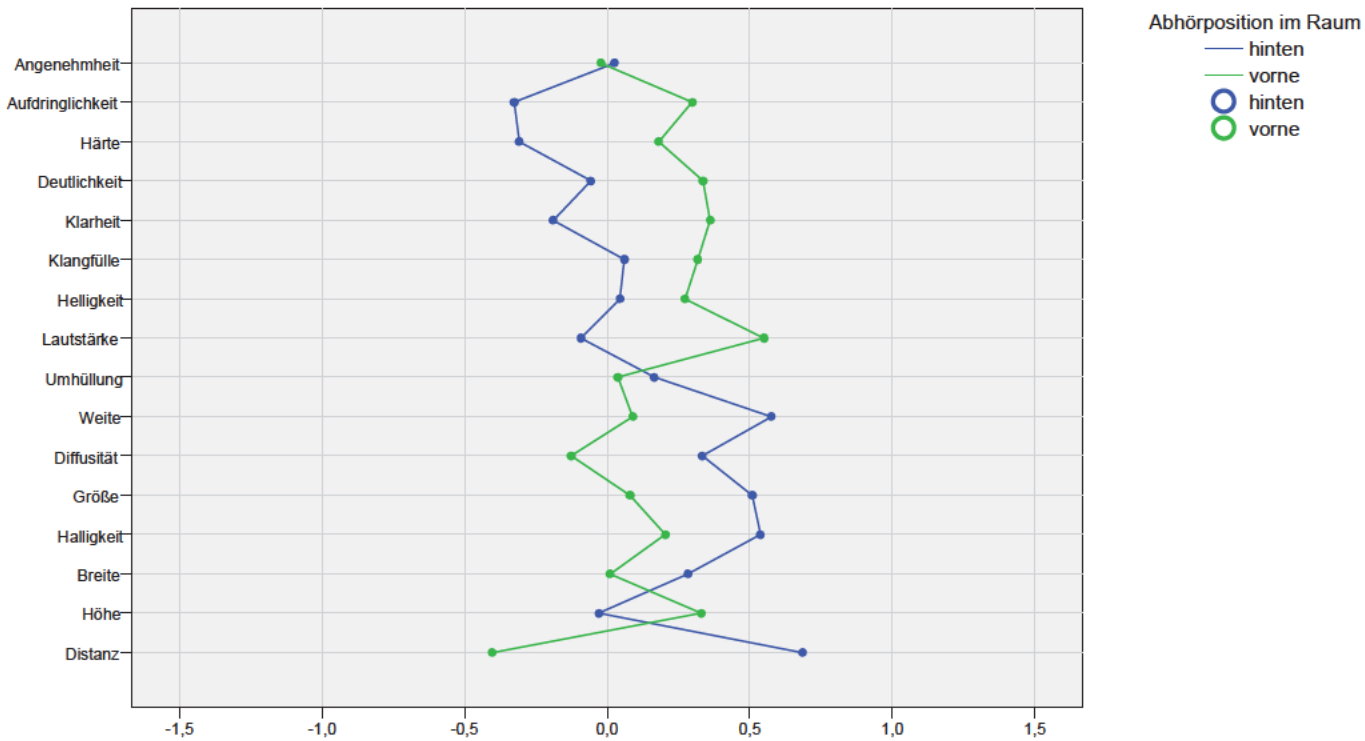


Abbildung 41 Hörposition x Merkmal(SPSS)

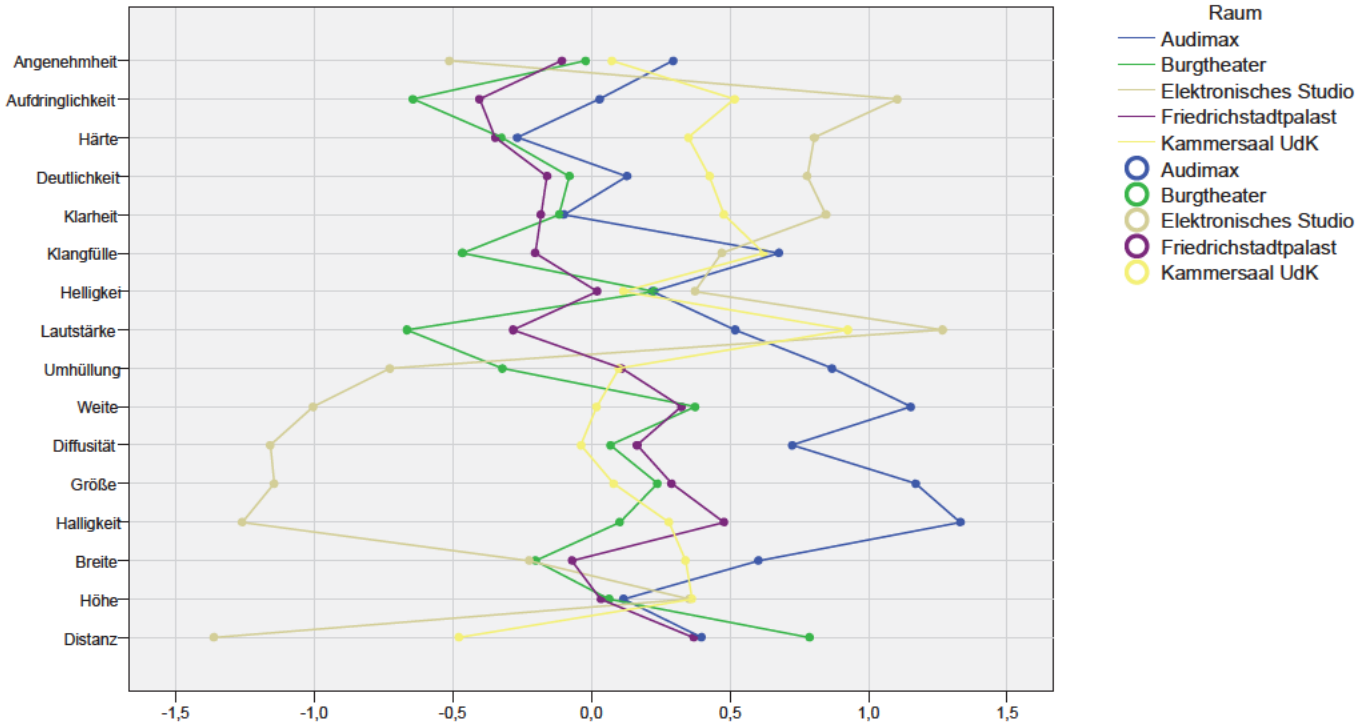


Abbildung 42 Raum x Merkmal(SPSS)

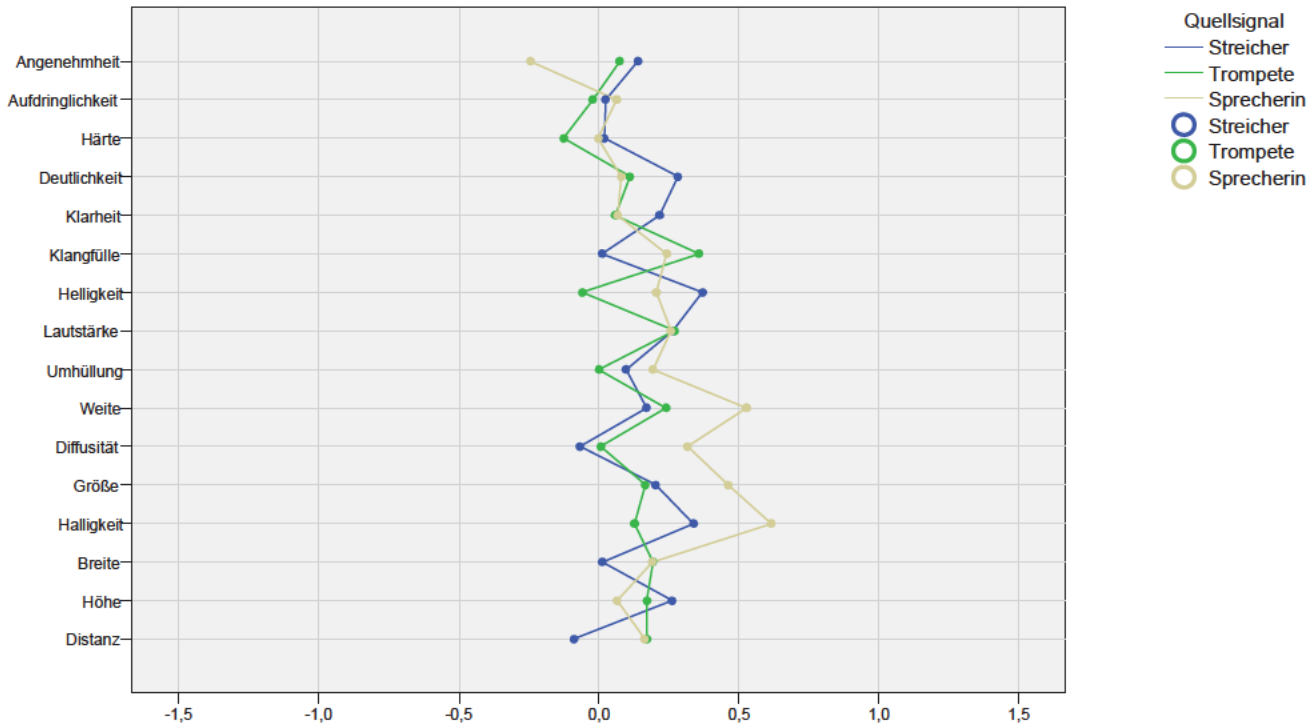


Abbildung 43 Quellsignal x Merkmal(SPSS)

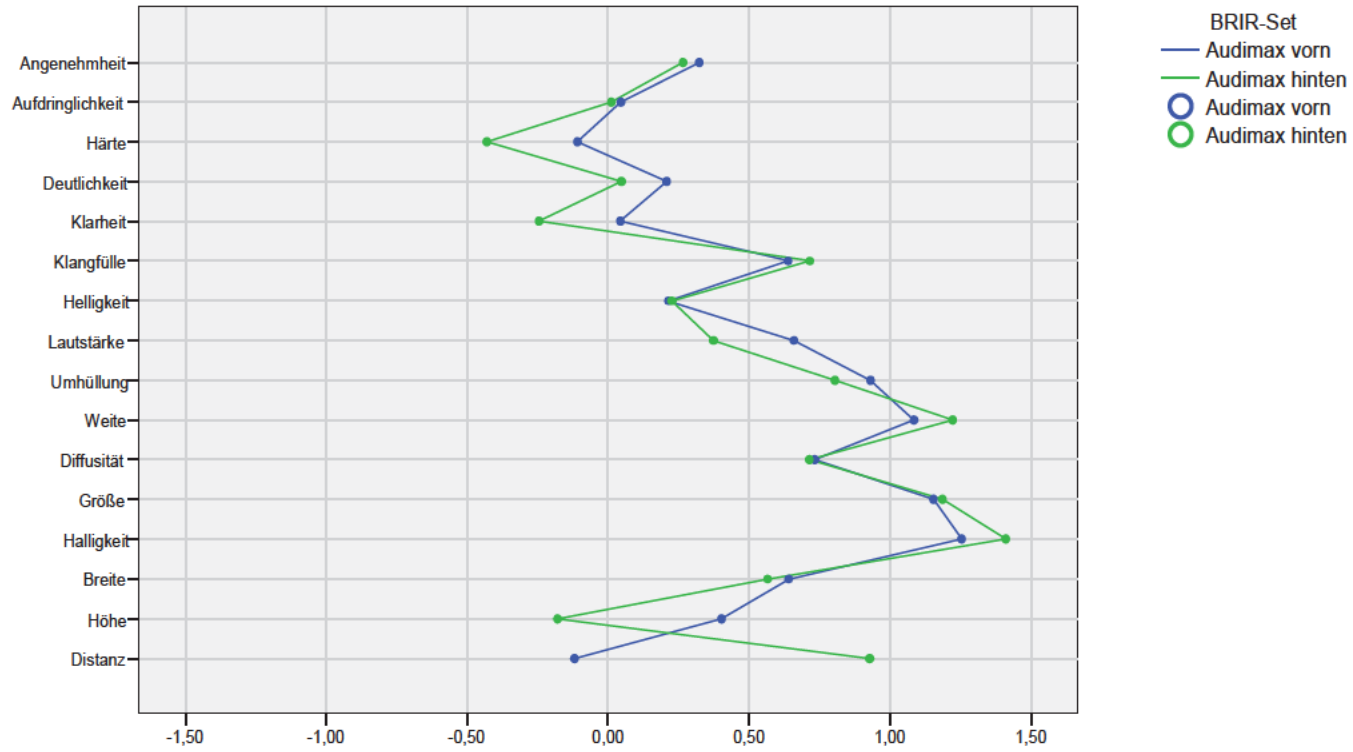


Abbildung 44 Hörpositionen im Audimax x Merkmal(SPSS)

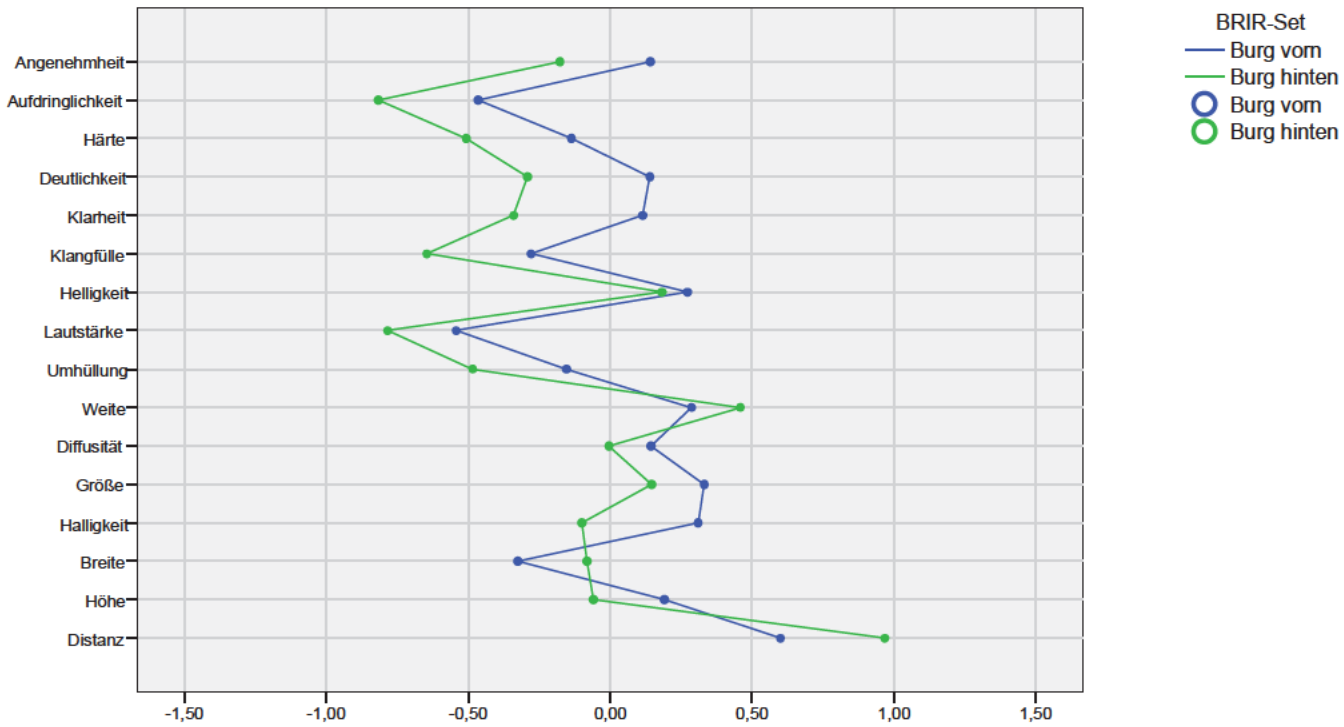


Abbildung 45 Hörpositionen Burgtheater x Merkmale(SPSS)

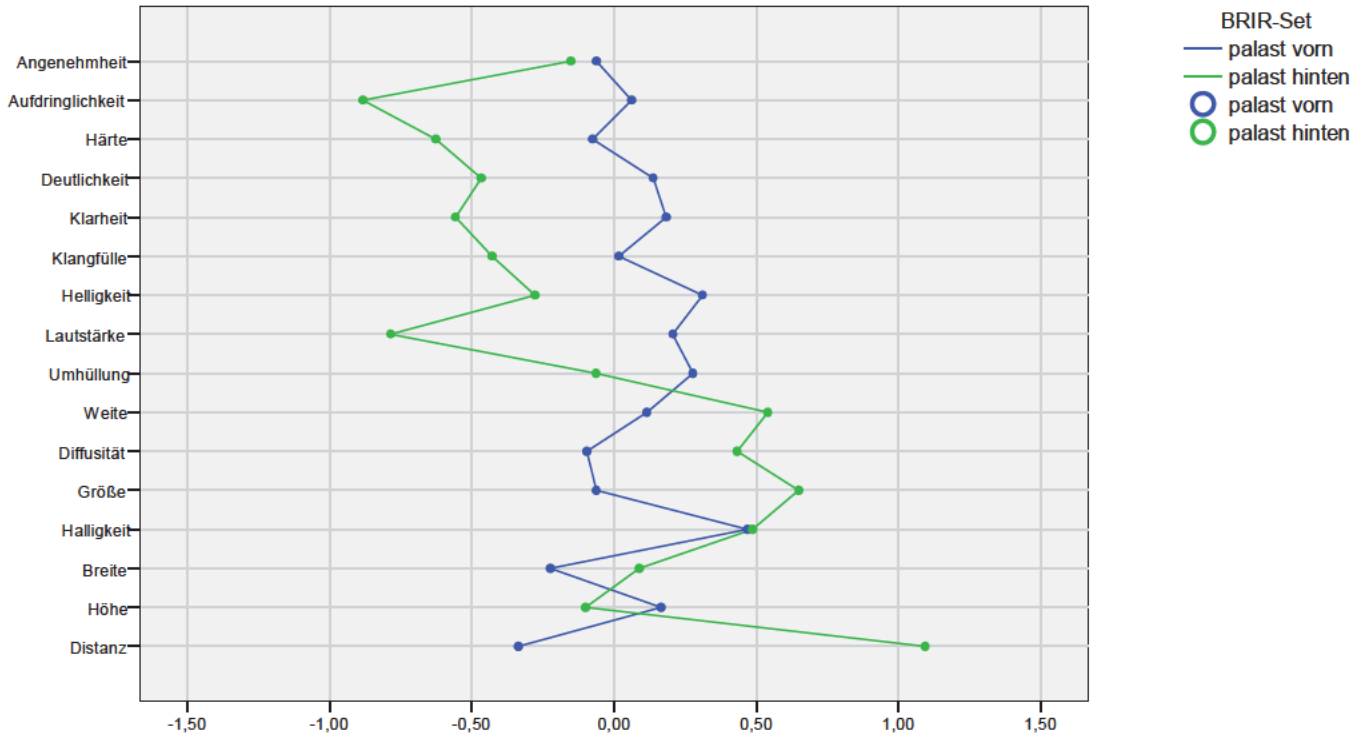


Abbildung 46 Hörpositionen Friedrichstadtpalast x Merkmale(SPSS)

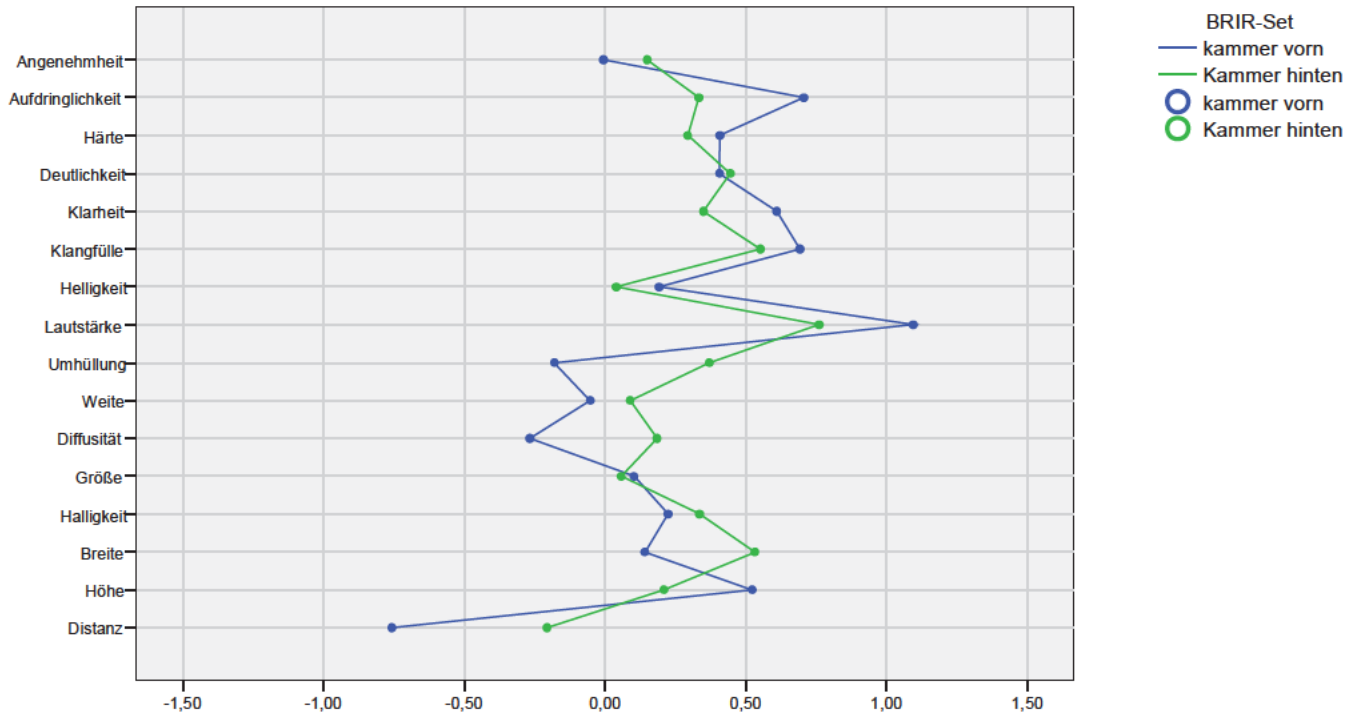


Abbildung 47 Hörpositionen Kammersaal x Merkmale(SPSS)

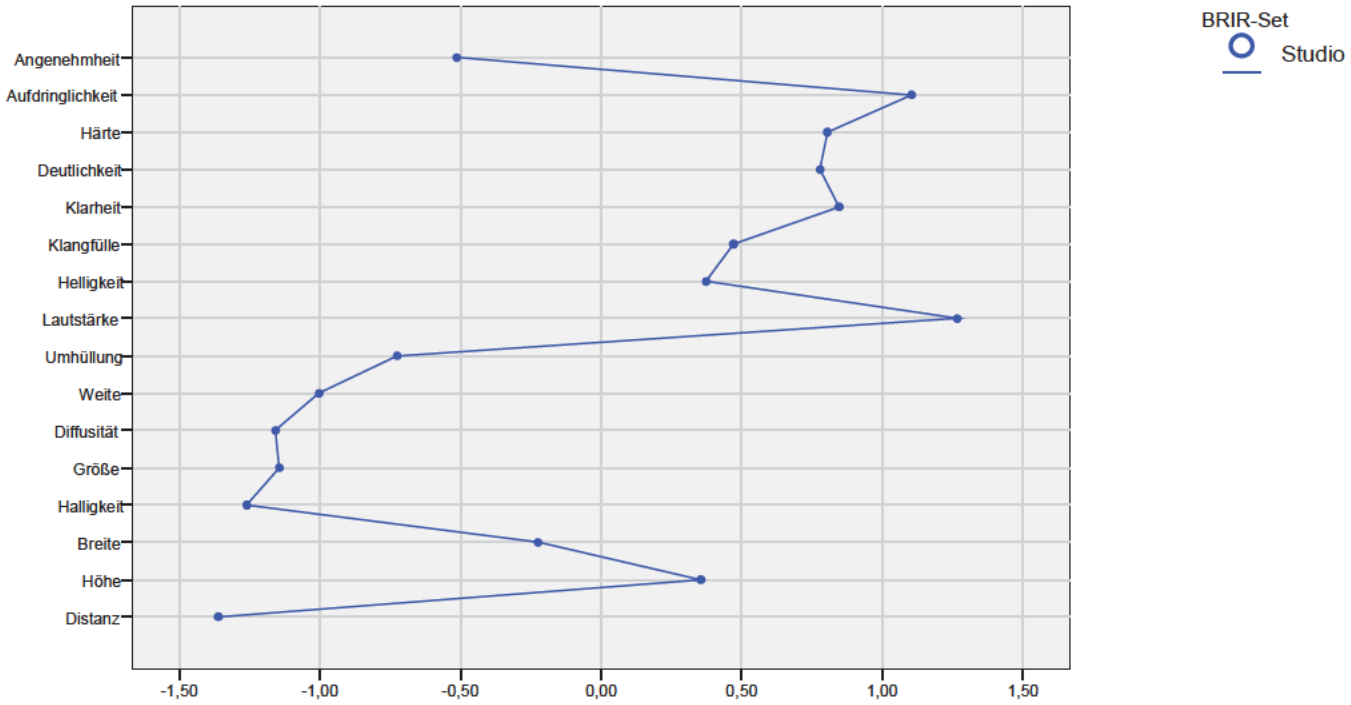


Abbildung 48 Hörposition Elektronisches Studio x Merkmale(SPSS)

Correlations

Variables	Statistics	Breite	Angenehmheit	Umhüllung	Halligkeit	Größe	Diffusität	Weite	Klarheit	Distanz	Härte	Aufdringlichkeit	Deutlichkeit	Lautstärke	Höhe	Klangfülle	Helligkeit
		Variables															
Breite	Pearson Correlation	1	,676*	,788*	,672*	,648	,652	,614								,620	
Angenehmheit	Pearson Correlation	,676*	1	,867**	,899**	,832**	,847**	,794*									
Umhüllung	Pearson Correlation	,788*	,867**	1	,908**	,788*	,810**	,772*									
Halligkeit	Pearson Correlation	,672*	,899**	,908**	1	,949**	,942**	,928**	-,561	,532	-,610						
Größe	Pearson Correlation	,648	,832**	,788*	,949**	1	,970**	,978**	-,700*	,681*	-,727*	-,532	-,571				
Diffusität	Pearson Correlation	,652	,847**	,810**	,942**	,970**	1	,962**	-,738*	,719*	-,752*	-,598	-,599				
Weite	Pearson Correlation	,614	,794*	,772*	,928**	,978**	,962**	1	-,763*	,736*	-,792*	-,593	-,625				
Klarheit	Pearson Correlation				-,561	-,700*	-,738*	-,763*	1	-,949**	,985**	,920**	,957**	,833**	,821**	,572	,592
Distanz	Pearson Correlation				,532	,681*	,719*	,736*	-,949**	1	-,950**	-,919**	-,898**	-,862**	-,837**	-,578	-,520
Härte	Pearson Correlation				-,610	-,727*	-,752*	-,792*	,985**	-,950**	1	,926**	,955**	,847**	,789*	,577	
Aufdringlichkeit	Pearson Correlation					-,532	-,598	-,593	,920**	-,919**	,926**	1	,944**	,968**	,698*	,798*	,538
Deutlichkeit	Pearson Correlation					-,571	-,599	-,625	,957**	-,898**	,955**	,944**	1	,893**	,738*	,710*	,622
Lautstärke	Pearson Correlation								,833**	-,862**	,847**	,968**	,893**	1	,698*	,902**	
Höhe	Pearson Correlation								,821**	-,837**	,789*	,698*	,738*	,698*	1	,501	
Klangfülle	Pearson Correlation	,620							,572	-,578	,577	,798*	,710*	,902**	,501	1	
Helligkeit	Pearson Correlation								,592	-,520		,538	,622				1

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabelle 19 Korrelationen der perzeptiven Merkmale untereinander(SPSS)

Correlations

Variables	Statistics	Nachhallzeit	EDT	G	Risetime	C50	IACC F 500,1000,2000	IACC E 500,1000,2000	Schwerpunktz	STI	C80	AlCons	Baßverhältnis	IACC L 500,1000,2000
		Variables												
Nachhallzeit	pearson correlation	1	,936**	-,420	,357	-,308	-,073	,111	,516	-,479	-,493	,559	,007	-,323
EDT	pearson correlation	,936**	1	-,239	,302	-,466	-,240	-,075	,604	-,606	-,582	,670*	-,076	-,543
G sm G (dB)	pearson correlation	-,420	-,239	1	-,773*	,262	,267	,118	-,507	,353	,346	-,430	,237	-,166
Risetime	pearson correlation	,357	,302	-,773*	1	-,735*	-,616	-,411	,792*	-,704*	-,733*	,694*	-,161	-,309
C50	pearson correlation	-,308	-,466	,262	-,735*	1	,865**	,701*	-,888**	,945**	,954**	-,880**	,078	,701*
IACC F 500,1000,2000	pearson correlation	-,073	-,240	,267	-,616	,865**	1	,956**	-,692*	,742*	,787*	-,650	,114	,639
IACC E 500,1000,2000	pearson correlation	,111	-,075	,118	-,411	,701*	,956**	1	-,488	,549	,598	-,439	,159	,559
Schwerpunktzeit	pearson correlation	,516	,604	-,507	,792*	-,888**	-,692*	-,488	1	-,945**	-,916**	,967**	-,214	-,454
STI	pearson correlation	-,479	-,606	,353	-,704*	,945**	,742*	,549	-,945**	1	,960**	-,977**	,174	,545
C80	pearson correlation	-,493	-,582	,346	-,733*	,954**	,787*	,598	-,916**	,960**	1	-,915**	-,025	,608
AlCons	pearson correlation	,559	,670*	-,430	,694*	-,880**	-,650	-,439	,967**	-,977**	-,915**	1	-,196	-,468
Baßverhältnis	pearson correlation	,007	-,076	,237	-,161	,078	,114	,159	-,214	,174	-,025	-,196	1	-,173
IACC L 500,1000,2000	pearson correlation	-,323	-,543	-,166	-,309	,701*	,639	,559	-,454	,545	,608	-,468	-,173	1

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabelle 20 Korrelationen der physikalischen Parameter untereinander(SPSS)

Correlations

		Halligkeit	Große	Umhüllung	Weite	Diffusität	Aufdringlichkeit	Lautstärke	Distanz	Härte	Deutlichkeit	Angenehmheit	Klarheit	Helligkeit	Breite	Klangfülle	Höhe
Nachhallzeit	pearson correlation	,933**	,964**	,856**	,953**	,932**	-,380	-,166	,572	-,629	-,457	,798**	-,627	-,321	,793*	,242	-,368
EDT	pearson correlation	,793*	,833**	,789*	,803**	,779*	-,131	,077	,401	-,410	-,240	,682*	-,444	-,291	,888**	,460	-,295
G Stärkemaß	pearson correlation	-,423	-,442	-,276	-,588	-,540	,750*	,712*	-,800**	,834**	,756*	-,207	,828**	,270	-,072	,528	,896**
Risetime	pearson correlation	,213	,378	-,018	,452	,437	-,767*	-,738*	,853**	-,791*	-,830**	-,027	-,860**	-,671*	,110	-,576	-,905**
C50	pearson correlation	-,106	-,256	,025	-,234	-,264	,253	,206	-,495	,316	,351	-,008	,422	,649	-,389	,031	,568
IACC F 500,1000,200	pearson correlation	,101	,010	,092	-,012	-,093	,131	,108	-,318	,100	,125	,064	,223	,511	-,341	,037	,479
IACCE 500,1000,200	pearson correlation	,258	,215	,155	,192	,085	-,057	-,065	-,076	-,134	-,095	,149	-,008	,389	-,291	-,044	,276
Schwerpunktzeit	pearson correlation	,382	,458	,256	,453	,478	-,363	-,293	,623	-,531	-,503	,156	-,611	-,657	,434	-,028	-,761*
STI	pearson correlation	-,332	-,418	-,188	-,399	-,406	,233	,156	-,527	,399	,387	-,178	,471	,588	-,495	-,095	,610
C80	pearson correlation	-,362	-,475	-,196	-,437	-,498	,362	,277	-,613	,454	,450	-,267	,532	,710*	-,497	,010	,591
AlCons	pearson correlation	,430	,491	,297	,482	,472	-,245	-,167	,562	-,460	-,405	,238	-,519	-,517	,501	,124	-,679*
Baßverhältnis	pearson correlation	,107	,202	-,041	,111	,190	-,232	-,270	,218	-,050	,004	,377	,005	,043	-,172	-,162	,176
IACC L 500,1000,200	pearson correlation	-,027	-,235	-,046	-,182	-,197	-,009	-,099	-,178	,000	-,018	-,105	,120	,356	-,538	-,232	,093

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tabelle 21 Korrelationen der physikalischen Maße mit den perzeptiven Merkmalen(SPSS)

Faktor 1 Räumlichkeit

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-1,881	,247		-7,602	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,465	,183	,949	8,005	,000

a. Dependent Variable: Faktor1 F1

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,949[a]	,902	,887	,24092

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

b. Dependent Variable: Faktor1 F1

Tabelle 22 physikalische Prädiktoren für Faktor 1(SPSS)

Faktor 2 Präsenz

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	,799	,301		2,651	,033
	Risetime RT (ms)	-,025	,008	-,780	-3,296	,013
2	(Constant)	2,317	,615		3,768	,009
	Risetime RT (ms)	-,042	,008	-1,278	-4,990	,002
	C50 C50 (dB)	-,121	,046	-,678	-2,646	,038
3	(Constant)	3,537	,272		12,996	,000
	Risetime RT (ms)	-,045	,003	-1,371	-15,695	,000
	C50 C50 (dB)	-,127	,015	-,714	-8,259	,000
	bassv Baßverhältnis	-,945	,137	-,411	-6,916	,001

a. Dependent Variable: Faktor2 F2

Model Summary[d]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,780[a]	,608	,552	,51948
2	,905[b]	,819	,759	,38116
3	,991[c]	,983	,973	,12846

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), C50 C50 (dB)

c. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), C50 C50 (dB), bassv Baßverhältnis

d. Dependent Variable: Faktor2 F2

Tabelle 23 physikalische Prädiktoren für Faktor 2(SPSS)

Faktor 3 Verständlichkeit

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	,287	,092		3,130	,017
	Risetime RT (ms)	-,009	,002	-,826	-3,873	,006
2	(Constant)	,859	,213		4,040	,007
	Risetime RT (ms)	-,014	,002	-1,285	-5,796	,001
	C80 C80 (dB)	-,040	,014	-,627	-2,826	,030

a. Dependent Variable: Faktor3 F3

Model Summary[c]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics R Square Change
1	,826[a]	,682	,636	,15788	,682
2	,929[b]	,863	,818	,11169	,182

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), C80 C80 (dB)

c. Dependent Variable: Faktor3 F3

Tabelle 24 physikalische Prädiktoren für Faktor 3(SPSS)

Faktor 4 Helligkeit

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,498	,141		-3,533	,010
	IACCF512 IACC F 500,1000,2000	,779	,210	,814	3,712	,008

a. Dependent Variable: Faktor4 F4

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,814[a]	,663	,615	,12609

a. Predictors: (Constant), IACCF512 IACC F 500,1000,2000

b. Dependent Variable: Faktor4 F4

Tabelle 25 physikalische Prädiktoren für Faktor 4(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-1,637	,305		-5,358	,001
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,552	,226	,933	6,869	,000
2	(Constant)	-2,213	,261		-8,465	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,716	,153	1,032	11,220	,000
	IACCL512 IACC L 500,1000,2000	1,601	,481	,306	3,325	,016

a. Dependent Variable: halligk Halligkeit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,933[a]	,871	,852	,29744
2	,977[b]	,955	,939	,19056

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

b. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s), IACCL512 IACC L 500,1000,2000

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-1,596	,207		-7,726	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,459	,153	,964	9,545	,000
2	(Constant)	-2,055	,232		-8,857	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,456	,113	,962	12,924	,000
	bassv Baßverhältnis	,408	,156	,195	2,621	,040
3	(Constant)	-2,198	,144		-15,309	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	2,091	,195	1,382	10,745	,000
	bassv Baßverhältnis	,330	,095	,158	3,478	,018
	edt EDT (s)	-,655	,188	-,448	-3,474	,018

a. Dependent Variable: groesse Größe

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,964[a]	,929	,918	,20121
2	,983[b]	,967	,956	,14838
3	,995[c]	,990	,984	,08797

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

b. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s), bassv Baßverhältnis

c. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s), bassv Baßverhältnis, edt EDT (s)

Tabelle 26 physikalische Prädiktoren für die Attribute Halligkeit, Größe(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-1,224	,317		-3,866	,006
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,025	,234	,856	4,375	,003

a. Dependent Variable: umhuellg Umhüllung

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,856[a]	,732	,694	,30837

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-1,417	,218		-6,489	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,346	,161	,953	8,335	,000
2	(Constant)	-1,760	,160		-10,985	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	2,292	,274	1,623	8,366	,000
	edt EDT (s)	-,976	,265	-,716	-3,690	,010

a. Dependent Variable: weite Weite

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,953[a]	,908	,895	,21265
2	,986[b]	,972	,963	,12704

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

b. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s), edt EDT (s)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-1,402	,229		-6,126	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	1,155	,169	,932	6,827	,000
2	(Constant)	-1,722	,204		-8,431	,000
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	2,036	,349	1,643	5,833	,001
	edt EDT (s)	-,909	,337	-,759	-2,696	,036

a. Dependent Variable: diffusit Diffusität

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,932[a]	,869	,851	,22285
2	,970[b]	,941	,921	,16187

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

b. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s), edt EDT (s)

Tabelle 27 physikalische Prädiktoren für die Attribute Umhüllung, Weite und Diffusität(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	,692	,263		2,631	,034
	Risetime RT (ms)	-,021	,007	-,767	-3,166	,016
2	(Constant)	1,986	,550		3,608	,011
	Risetime RT (ms)	-,035	,007	-1,266	-4,703	,003
	C50 C50 (dB)	-,103	,041	-,679	-2,520	,045
3	(Constant)	2,987	,388		7,692	,001
	Risetime RT (ms)	-,038	,004	-1,356	-9,264	,000
	C50 C50 (dB)	-,108	,022	-,714	-4,926	,004
	bassv Baßverhältnis	-,775	,195	-,395	-3,975	,011

a. Dependent Variable: aufdring Aufdringlichkeit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,767[a]	,589	,530	,45333
2	,895[b]	,800	,734	,34127
3	,976[c]	,952	,923	,18329

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), C50 C50 (dB)

c. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), C50 C50 (dB), bassv Baßverhältnis

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	1,030	,330		3,125	,017
	Risetime RT (ms)	-,024	,008	-,738	-2,892	,023
2	(Constant)	5,918	1,732		3,417	,014
	Risetime RT (ms)	-,041	,008	-1,245	-4,922	,003
	STI STI	-5,946	2,087	-,721	-2,848	,029
3	(Constant)	6,631	1,169		5,672	,002
	Risetime RT (ms)	-,042	,006	-1,273	-7,602	,001
	STI STI	-5,590	1,384	-,678	-4,039	,010
	bassv Baßverhältnis	-,834	,282	-,357	-2,958	,032
4	(Constant)	5,941	,637		9,323	,001
	Risetime RT (ms)	-,041	,003	-1,235	-14,027	,000
	STI STI	-3,914	,848	-,474	-4,616	,010
	bassv Baßverhältnis	-1,023	,155	-,438	-6,579	,003
	IACCL512 IACC L 500,1000,2000	-1,587	,419	-,298	-3,785	,019

a. Dependent Variable: lautstae Lautstärke

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,738[a]	,544	,479	,56846
2	,898[b]	,806	,742	,40035
3	,964[c]	,930	,887	,26446
4	,992[d]	,985	,969	,13813

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), STI STI

c. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), STI STI, bassv Baßverhältnis

d. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), STI STI, bassv Baßverhältnis, IACCL512 IACC L 500,1000,2000

Tabelle 28 physikalische Prädiktoren für die Attribute Aufdringlichkeit und Lautstärke(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,892	,277		-3,216	,015
	Risetime RT (ms)	,031	,007	,853	4,326	,003

a. Dependent Variable: distanz Distanz

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,853[a]	,728	,689	,47846

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,488	,144		-3,375	,012
	G sm G (dB)	,071	,018	,834	4,000	,005

a. Dependent Variable: haerte Härte

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,834[a]	,696	,652	,27626

a. Predictors: (Constant), G sm G (dB)

Tabelle 29 physikalische Prädiktoren für die Attribute Distanz und Härte(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	,576	,131		4,413	,003
	Risetime RT (ms)	-,013	,003	-,830	-3,932	,006
2	(Constant)	1,478	,212		6,967	,000
	Risetime RT (ms)	-,019	,002	-1,213	-8,746	,000
	IACCF512 IACC F 500,1000,2000	-1,104	,246	-,622	-4,485	,004

a. Dependent Variable: deutlich Deutlichkeit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,830[a]	,688	,644	,22505
2	,964[b]	,928	,905	,11651

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), IACCF512 IACC F 500,1000,2000

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,573	,172		-3,332	,013
	nachhallz Nachhallzeit in (s)	,445	,127	,798	3,501	,010

a. Dependent Variable: angenehm Angenehmheit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,798[a]	,636	,585	,16747

a. Predictors: (Constant), nachhallz Nachhallzeit in (s)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	,633	,143		4,431	,003
	Risetime RT (ms)	-,016	,004	-,860	-4,462	,003
2	(Constant)	1,498	,302		4,959	,003
	Risetime RT (ms)	-,020	,003	-1,039	-7,225	,000
	IACCE512 IACC E 500,1000,2000	-1,027	,340	-,435	-3,023	,023

a. Dependent Variable: klarheit Klarheit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,860[a]	,740	,703	,24648
2	,947[b]	,897	,863	,16760

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), IACCE512 IACC E 500,1000,2000

Tabelle 30 physikalische Prädiktoren für die Attribute Deutlichkeit, Angenehmheit und Klarheit(SPSS)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,171	,137		-1,252	,251
	C80 C80 (dB)	,033	,012	,710	2,668	,032

a. Dependent Variable: helligkt Helligkeit

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,710[a]	,504	,433	,14459

a. Predictors: (Constant), C80 C80 (dB)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	-,487	,134		-3,635	,008
	edt EDT (s)	,688	,134	,888	5,120	,001

a. Dependent Variable: breite Breite

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,888[a]	,789	,759	,18335

a. Predictors: (Constant), edt EDT (s)

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients B	Unstandardized Coefficients Std. Error	Standardized Coefficients Beta	t	Sig.
1	(Constant)	,459	,063		7,252	,000
	Risetime RT (ms)	-,009	,002	-,905	-5,632	,001
2	(Constant)	,205	,109		1,881	,109
	Risetime RT (ms)	-,005	,002	-,529	-2,818	,030
	G sm G (dB)	,021	,008	,487	2,596	,041

a. Dependent Variable: hoehe Höhe

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,905[a]	,819	,793	,10919
2	,956[b]	,915	,886	,08095

a. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms)

b. Predictors: (Constant), Risetime RT (ms), G sm G (dB)

Tabelle 31 physikalische Prädiktoren für die Attribute Helligkeit, Breite und Höhe(SPSS)