

## **Exposé Magisterarbeit Eric Reiß**

### **Thema**

Zur perceptiven Bewertung von binaural simulierten raumakustischen Umgebungen.

### **Abstract**

In dieser Arbeit sollen Zusammenhänge zwischen der subjektiven Wahrnehmung von Räumen und physikalisch messbaren Parametern dieser Räume untersucht werden.

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 normalen Messmikrofon nicht möglich. Psychologische Methoden, die Ergebnisse auf der perceptiven Ebene liefern -also die Komponente der menschlichen Wahrnehmung berücksichtigen-, wären hier nötig, haben in der Bauakustik aber keinen großen Stellenwert. Dabei wäre es interessant, um eine gewisse Wahrnehmung in einem Raum zu erzeugen, einfach an einem physikalischen Wert zu drehen. Untersuchungen, die die Zusammenhänge subjektiver und objektiver Bewertung von Raumakustik näher beleuchten, wurden unter anderem von Wilkens und Lehmann durchgeführt. Diese Untersuchungen stammen aus den Jahren 1977/1980.

Eine erneute Arbeit zu diesem Thema bietet sich an, da zur Aufnahme der binauralen Raumimpulsantworten ein über alle Freiheitsgrade des menschlichen Kopfes freibewegliches Kunstkopfmessrobotersystem zur Verfügung steht, mit dessen Hilfe es möglich ist, Räume mittels dynamischer Binauralsynthese zu auralisieren.

Meine Untersuchung wird Teile der Untersuchungen von Wilkens und Lehmann nachempfinden, allerdings mit modernen technischen Möglichkeiten der Raumsimulation und der BRIR-Datensatz-Akquise. Es werden dabei auch auf übliche psychologische Forschungsmethoden zurückgegriffen, die auch in der Psychoakustik ihre Anwendung finden. So wird bei der Untersuchung das Auffinden von Gegensatzpaaren zur Erstellung des Fragebogens für das Semantische Differenzial im Gegensatz zu Wilkens und Lehmann über die Repertory Grid-Technik erfolgen. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass den Versuchspersonen keine Konstrukte von Gegensatzpaaren vorgegeben werden, sondern die Versuchspersonen ihrer Wahrnehmung entsprechend selbst Konstrukte entwerfen, die sich dann als Semantisches Differenzial bewerten lassen. (George A. Kelly 1986)

Zur Messung der binauralen Impulsantworten (BRIR) der Säle kommt 'Fast And Binaural Impulseresponse Acquisition', FABIAN, ein computergesteuertes Binaural Mess- und Wiedergabesystem zum Einsatz. Im anschließenden Hörtest werden die Räume mittels dynamischer Binauralsynthese den Probanden präsentiert. Ein leistungsfähiges Computersystem macht die Bereitstellung der BRIR von mehreren Räumen gleichzeitig möglich. Bei dem anschließenden Hörtest wird die Repertory Grid- Technik (RGT) und das Semantische Differenzial (SD) genutzt. Die Ergebnisse werden dann mit den Ergebnissen der monoaural gemessenen Raumimpulsantworten korreliert.

## Einleitung & Fragestellung

Das Forschungsgebiet "Suche nach Korrelation zwischen technischen und perzeptiven Maßen bzgl. Raumakustik" existiert schon seit einiger Zeit, die Methoden zur Untersuchung haben sich aber über die Jahre stark verändert. Bei frühen Untersuchungen wurden Dirigenten und Kritiker interviewt, deren Urteile aus der Erinnerung stammten. Später verwandte man für Interviews Fragebögen. Es folgten Untersuchungen die mit Musikausschnitten aus verschiedenen Sälen arbeiteten, die einkanalig dargeboten wurden. Der nächste Schritt waren stereophon in Sälen aufgenommen und über Lautsprecher im RAR wiedergegebene Beispiele, bei denen man bereits zwischen Sälen umschalten konnte.

Bei Lehmann kam für die Untersuchungen bereits ein Kunstkopfmesssystem zum Einsatz welches ein Konzert für einen Sitzplatz und eine Kopfposition aufzeichnete. Bei der Wiedergabe wurden die Ohrsignale den Kopfbewegungen entsprechend nachgeführt und die Pegel und Laufzeiten angepasst. So konnte eine zweifelsfreie Vorn-Hinten-Ortung erreicht werden. Moldrzyk entwickelte ein Mess- und Wiedergabesystem, bei dem der Kunstkopfdumie bereits über ein Halsgelenk horizontal gedreht werden konnte. Lindau entwickelte dann 2006 das horizontal und vertikal per Halsgelenk schwenkbare Mess- und Wiedergabesystem FABIAN. Die Letztgenannten zwei System arbeiten bei der Wiedergabe mit dynamischer Binauralsynthese.

Seit 2007 existiert an der Technischen Universität Berlin das Binauralmesssystem FABIAN. Damit ist es möglich akustische Umgebungen zu ‚konservieren‘ und später durch eine dynamische Binaural-Synthese zu reproduzieren. Unter diesem Aspekt erscheint es sinnvoll Untersuchungen zu diesen akustischen Fragestellungen, in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt wurden, noch einmal nachzuvollziehen, da präzisere aber auch neue Erkenntnisse, zu erwarten sind. Eine solche Untersuchung ist die 1980 von Wilkens und Lehmann verfasste Abhandlung zum ‚Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien‘. (Lehmann und Wilkens 1980)

Der große Vorteil der dynamischen Binauralsynthese gegenüber den herkömmlichen Methoden ist, dass die Raumsimulation viel realistischer ist. Die BRIR-Datensätze werden über alle Freiheitsgrade der Bewegungsspielräume des menschlichen Kopfes gemessen. Jeder Datensatz besteht aus ca 1400 BRIRs und nicht nur aus einer BRIR wie bei Wilkens. Die zur Messung gewählte Auflösung der Kopfpositionen des Messsystems orientiert sich an den Auflösungsgrenzen des menschlichen Gehörs. Diese hohe Zahl an BRIRs lässt sich nur mit einem hochgradig automatisierten System wie FABIAN generieren. Ausgehend von diesen BRIR Datensätzen werden Hörtests mittels RGT und SD durchgeführt. Die erhaltenen perzeptiven empirischen Daten werden mit den technischen Maßen aus den monauralen RIRs korreliert. Ein Hohes Maß an Korrelation steht hier für einen direkten Zusammenhang einer Wahrnehmung mit einem technischen Maß.

Im Ergebnis der Arbeit wird auch ein Fragebogen mit verschiedenen Konstrukten von Gegensatzpaaren generiert, der zur subjektiven Beurteilung von Sälen genutzt werden kann. Im Gegensatz zu Lehmann und Wilkens werden diese Gegensatzpaare allerdings nicht vorgegeben, sondern durch das Anwenden der RGT gefunden.

Es soll die Frage geklärt werden, ob sich im Wesentlichen die Ergebnisse von Wilkens, Lehmann bestätigen lassen und sich neue Erkenntnisse bezüglich akustischer Maße aufgrund der mit verbesserter Technologie und Methodik durchgeführten Hörversuche ergeben.

## **Stand der Forschung**

Die beiden wichtigsten Arbeiten, auf die sich die Magisterarbeit stützt, stammen von Wilkens(1977) und Lehmann und Wilkens (1980). In beiden Arbeiten wurde der Zusammenhang subjektiver raumakustischer Merkmale mit physikalisch messbaren akustischen Raumgrößen untersucht, allerdings mit den damals durchführbaren Methoden. So wurden in den zu untersuchenden sechs Sälen Aufnahmen, mit statischem Kunstkopfmikrofon, eines Orchesters auf jeweils fünf Plätzen angefertigt. Bei den Hörtests erfolgte die Wiedergabe binaural, über Kopfhörer, dabei wurden den Kopfbewegungen der Probanden entsprechend die Ohrsignale im Pegel und in der Laufzeit so verändert, ‚wie‘ es beim natürlichen Hören der Fall wäre. Hierbei wird die Kopfdrehung des Hörers abgetastet und die Ohrsignale in Laufzeit und Pegel angepasst. Dies geschieht nach einer Anordnung von Boeger und Kaps. So konnte eine Vorne-Hinten-Vertauschung ausgeschlossen werden. Allerdings konnte bei diesem Verfahren die Wiedergabe der sich bei Kopfdrehung für beide Ohren ändernden Kopfübertragungsfunktion nicht realisiert werden. Außerdem spielt das Orchester zwar jeweils dieselben Stücke bei den Aufnahmen, jedoch ist eine gewisse Varianz in der Darbietung nicht auszuschließen. (Lehmann und Wilkens 1980) Auf der perceptiven Ebene spricht Wilkens von drei relevanten Beurteilungsaspekten.

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

Nach Korrelation mit raumakustischen Kriterien stellt Lehmann fest, dass die Stärke und Ausdehnung durch das Stärkemaß, die Deutlichkeit durch die Schwerpunktzeit und die Klangfarbe durch die Neigung des Frequenzganges der Nachhallzeit oder der Early-Decay-Time beschrieben werden kann. Wilkens kommt zwar zu diesen drei Beurteilungsaspekten, schließt aber nicht aus, dass noch weitere Aspekte eine Rolle spielen könnten, er hält es aber nicht für besonders wahrscheinlich. Auch dies gilt es bei dieser Untersuchung nachzuprüfen. (Lehmann und Wilkens 1980)

Wilkens betont auch, dass bei der Beurteilung der Akustik der Binauraldatensätze der Unterschied bei der Gegenüberstellung von Plätzen innerhalb eines Saals manchmal bedeutender ist als bei der Gegenüberstellung zweier unterschiedlicher Säle. (Wilkens 1977)

## **Methode und Quellen**

### **Messung der Impulsantwort (RIR) und der binauralen Impulsantworten (BRIR)**

Für die Hörversuche wurden seit September 2007 in verschiedenen Sälen, die für Sprach- und Musikaufführungen und Produktion derselben genutzt, werden die binauralen (BRIR) und monauralen Raumimpulsantworten (RIR) gemessen. Die Messung dieser Daten erfolgt mit dem computergestützten binauralen Kunstkopfbotermesssystem FABIAN, das es ermöglicht, die binauralen Raumimpulsantworten über den kompletten Bewegungsbereich des menschlichen Kopfes mit einer Schrittweite von bis zu 1° zu messen(Lindau 2006). Im Gegensatz zu früheren Systemen kann der Kunstkopf nicht nur horizontal, sondern auch auf der vertikalen Ebene bewegt werden. Somit erhält man für jeden gemessenen Sitzplatz eine BRIR Datensatz, der es im Anschluss ermöglicht, den gemessenen Platz zu auralisieren. Die Simulation erfolgt mittels dynamischer Binauralsynthese, die Ortung der Kopfposition des Probanden erfolgt via Headtracking. Mit dieser Technik ist es möglich einen direkten A-B Vergleich der Akustik zweier oder mehrerer Räume, die eigentlich weit von einander entfernt liegen durchzuführen. Das Umschalten zwischen den Räumen erfolgt per Knopfdruck. Die Aufnahme der monauralen RIR erfolgt mittels Messmikrofon mit Kugelcharakteristik. Neben

den BRIR's, die über einen Winkel von  $152^\circ$  in  $2^\circ$  Schritten horizontal und auf der  $0^\circ$  Ebene vertikal gemessen wurden, werden die folgenden physikalischen Parameter aus den RIR's bestimmt: die Nachhallzeit nach Sabine und nach Eyring, die Early-Decay-Time, die Schwerpunktzeit, die Risetime, das Bassverhältnis, das Deutlichkeitsmaß für Sprache, das Klarheitsmaß für Musik, das Hallmaß, den Artikulationsverlust für Sprache, den interauralen Kreuzkorrelationskoeffizient und das Stärkemaß (Weinzierl 2008). Die monaurale Impulsantwort wird an der Position von ‚F.A.B.I.A.N.’s‘ Kopfmittle gemessen. Die Messpositionen im Saal beziehen sich auf den Hallradius. So entspricht Position I etwa einem Abstand vom Lautsprecher, der etwa dem Hallradius entspricht und befindet sich auf der Raummittelachse, dies ergibt einen Sitzplatz in der Mitte der Sitzreihe nahe der Bühne. Position II befindet sich circa einem dreifachen Hallradius entfernt vom Messlautsprecher aus der Mitte heraus versetzt im hinteren Drittel des Saals. Bei der Wahl der Positionen beziehe ich mich auf eine frühere Untersuchung von Wilkens und Lehmann von 1980. Damals wurden vier Positionen pro Saal gemessen, (Lehmann und Wilkens 1980) ich benutze allerdings nur zwei Positionen und nicht vier. Als Messsignale für die Messung der Impulsantworten wird ein Sweep verwendet. Dieses Messsignal hat einen Frequenzbereich von 20Hz -20kHz. Es beginnt mit einem 20Hz Ton, der dann bis 20kHz ansteigt.

Bei der Auswahl der Säle wurde darauf geachtet, dass verschiedene Räume als hoch variierende Datensätze für die Auralisation vorliegen. Hohe Varianz ist eine Voraussetzung der Repertory Grid Technik. So wurde das Wiener Burgtheater (Sprechtheater), der Berliner Friedrichstadtpalast (Revuetheater) und der Kammermusiksaal der Universität der Künste (Kammermusiksaal) für die Sammlung der Binauraldatensätze gewählt. Des Weiteren wird noch auf Räume der BRIR's Datenbank des Fachbereich für Audiokommunikation zurückgegriffen. Das sind zum einen das Elektronische Studio der TU-Berlin, sowie das Audimax der TU-Berlin H104 (großer Vorlesungssaal). In all diesen Räumen, außer im TU-Studio (nur eine Messposition), wurden jeweils an zwei Sitzpositionen BRIR's gesammelt. Die Verschiedenartigkeit der Räume besteht in der Größe, der Art der Nutzung, der Bauform, den verwandten Materialien etc.

## **Hörversuche und Auswertung**

Beim Hörversuch bekommen die Probanden per Kopfhörer Stimuli dargeboten, die mit den BRIR's der Säle gefaltet sind. Die Stimuli [Geige, Bläser, Sprache(Frauenstimme)] entstammen der Datenbank nachhallfreier Samples, die im Rahmen mehrerer Abschlussarbeiten am Institut für Audiokommunikation an der TU-Berlin erstellt wurden.

Der Hörversuch besteht aus zwei Teilen. Beim ersten Teil werden im RGT Verfahren perzeptive Qualitäten gesucht, die daraufhin über ein Semantisches Differenzial auf Ihre Relevanz hin getestet werden. Danach werden die Daten aller Versuchspersonen über perzeptive Qualitäten zusammengefasst und es wird ein Semantisches Differenzial gebildet. Die Auswahl der Gegensatzpaare kann über eine Clusteranalyse erfolgen. Beim zweiten Teil des Hörversuchs wird dann durch eine größere Anzahl von Probanden für jeden Raum ein Semantisches Differenzial bewertet. Die aus der anschließenden Mittelwertanalyse der Profile aus dem SD erhaltenen Ergebnisse über die perzeptiven Qualitäten der Säle werden dann mittels Faktorenanalyse gruppiert und mit den physikalischen Parametern korreliert, um Abhängigkeiten, die zwischen den objektiv messbaren physikalischen Werten und den subjektiv wahrgenommenen Eigenschaften der Räume bestehen, zu zeigen. Des Weiteren wird eine Clusteranalyse durchgeführt, um etwaige Mehrfachbeschreibungen derselben Qualität durch mehrere Konstrukte auszuschließen.

Um so viele verschiedene Konstrukte wie möglich zu erhalten, wird darauf geachtet, dass die Versuchspersonen in unterschiedlichster Weise akustisch vorbelastet sind. Außerdem wurden von der akustischen Umgebung her verschiedene Säle ausgewählt.

Dies garantiert eine hohe Varianz der Ergebnisse, welche erwünscht ist, und gegeben sein muss, damit die RGT gelingt. vgl.(Berg, Rumsey 1999)

## 5. Zeitplan

September 2007 bis Mai 2008	-Messung in den Räumen
September 2007 bis Januar 2008	-Aufbereitung der Messdaten für den Hörtest
Januar 2008	-Erstellen des Versuchsdesigns
Januar 2008 bis Februar 2008	-Hörtest RGT und Hörtest SD
April / Mai 2008	-Messung der IR in Friedrichstadtpalast, Studio, Reflektionsarmer Raum (RAR),
Oktober 2008	-Messung der RIR im Kammersaal UdK
Ab November 2008	-Auswertung der Ergebnisse, Verfassen der Arbeit

## Literatur

Berg and Rumsey (1999). *Spatial Attribute Identification and Scaling by Repertory Grid Technique and other methods*. AES paper, AES 16<sup>th</sup> international Conference

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

Lehmann, P. und Wilkens, H. (1980). *Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien..* ACUSTICA Vol.45, S.10 – 23

Lindau, A. (2006). *Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgraden*. Magisterabschlußarbeit am Fachbereich für Audiokommunikation an der TU Berlin

Lindau Alexander, Torben Hohn, Stefan Weinzierl (2007). *Binaural Resynthesis for comparative studies of acoustical environments*. AES Convention Paper 7032. 122th AES Convention, Vienna

Weinzierl, S.(Hrsg) (2008). *Handbuch der Audiotechnik*. Heidelberg: Springer,

Wilkens, H. (1977). *Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen*. :ACUSTICA Vol.38, S.256 - 268