



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
FAKULTÄT I - GEISTESWISSENSCHAFTEN
INSTITUT FÜR SPRACHE UND KOMMUNIKATION

Erstellung virtueller Konzerträume für Musiker

Exposé zur Masterarbeit

Vorgelegt von:

Christoph Böhm

Wintersteinstraße 15

10587 Berlin

E-Mail: christoph.boehm@campus.tu-berlin.de

Matrikelnummer: 347152

Fachsemester: 4

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Weinzierl

Zweitgutachterin:

Zora Schärer Kalkandjiev M.A.

Eingereicht am: 20.01.2015

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Einleitung und Fragestellung	3
3 Stand der Forschung	4
4 Methode und Quellen	5
4.1 Berechnung der virtuellen akustischen Umgebungen	6
4.2 Laborversuch	7
4.3 Evaluation	8
5 Arbeits- und Zeitplan	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Literaturverzeichnis	10

1 Zusammenfassung

Im Kontext des Forschungsprojekts „Raumakustik und musikalische Interpretation“ am Fachgebiet Audiokommunikation soll ein technisches Verfahren zur Erstellung von virtuellen Konzerträumen für Musiker mit Hilfe von dynamischer Binauralsynthese entwickelt werden. Ein Ensemble von vier Musikern soll in einer virtuellen akustischen Umgebung (VAE¹) miteinander musizieren können, um Untersuchungen zum Einfluss der Raumakustik auf die musikalische Interpretation durchführen zu können. Hierfür müssen Computersimulationen entsprechender Räume mit der Simulations- und Auralisations-Software Raven eingerichtet und berechnet werden. Dabei ist auf eine realitätsnahe Implementierung der Schallquellenpositionen und Richtcharakteristiken zu achten. Mit Hilfe der in den Simulationen berechneten binauralen Impulsantworten und einem geeigneten Laboraufbau zur Erzeugung der virtuellen akustischen Umgebung soll ein erster Probelauf mit anschließender Evaluation der Erfahrungen der Musiker mit dem System durchgeführt werden.

2 Einleitung und Fragestellung

Die Akustik spielt für alle Nutzungsarten von Räumen eine entscheidende Rolle für die Rezeption von Schallereignissen. Besondere Relevanz kommt der Akustik in musikalischen Aufführungsräumen zu. In diesen Räumen ist die Raumakustik maßgeblich für die Eigenschaften der Übertragung des Schalls vom Sender zum Empfänger verantwortlich. Die Musiker bilden in diesem Fall die Sender, das Publikum den Empfänger. Dabei ist jedoch nicht nur das Publikum, sondern auch der Musiker selbst als Empfänger zu betrachten. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich eine Abhängigkeit zwischen der musikalischen Interpretation des Musikers und der Raumakustik.

Diese Abhängigkeit wird im Forschungsprojekt „Raumakustik und musikalische Interpretation“ am Fachgebiet Audiokommunikation untersucht. Nach vorangegangenen Arbeiten über das Verhalten einzelner Musiker in realen Räumen und in durch dynamische Binauralsynthese realisierten virtuellen Räumen, soll nun das Verhalten mehrerer Musiker im Ensemble analysiert werden.

Diese Masterarbeit hat zum Ziel, eine geeignete Versuchsumgebung für diese Fragestellung zu schaffen. Zuvor definierte, virtuelle Räume sollen für ein Musiker-Quartett auralisiert werden. Hierbei wird die Software Raven zur Simulation der Schallfelder zum Einsatz kommen. Im reflexionsarmen Raum als Laborumgebung soll ein gemeinsames Musizieren der Musiker in der virtuellen akustischen Umgebung mittels dynamischer Binauralsynthese realisiert werden. Es werden die Signale der Instrumente aufgenommen

¹Virtual Acoustic Environment

und nach einer Faltung in Echtzeit mit den zuvor berechneten binauralen Raumimpulsantworten (BRIR²) über geeignete Kopfhörer für jeden Musiker wiedergegeben. Die Plausibilität der Auralisation wird durch Interviews mit den Musikern evaluiert.

3 Stand der Forschung

Nach vorangegangenen Studien zum Einfluss der Raumakustik auf die musikalische Interpretation (Von Békésy, 1968; Bolzinger et al., 1994; Kato et al., 2007, 2008; Ueno et al., 2010) beschäftigten sich Schärer Kalkandjiev und Weinzierl (2013a) mit für die Perzeption relevanten Kriterien zur Charakterisierung der musikalischen Darbietung und setzten einen umfangreichen Satz Parameter für die Raumakustik ein. Es wurde die Interpretation eines Musikstücks durch einen Musiker in sieben realen Räumen beobachtet. Die Darbietungen wurden aufgezeichnet und mithilfe computergestützter Signalverarbeitung untersucht. Außerdem wurden raumakustische Parameter gemessen. In der statistischen Auswertung der Ergebnisse konnten klare Bezüge zwischen verschiedenen Parametern der Interpretation und Raumakustik festgestellt werden.

Um diese Erkenntnisse zu unterstreichen wurde eine weitere Studie durchgeführt (Schärer Kalkandjiev und Weinzierl, 2013b). Die wichtigste Veränderung bestand in der Durchführung in einer Laborumgebung. So wurden nunmehr 14 verschiedene computersimulierte Räume mittels dynamischer Binauralsynthese für die Musiker auralisiert. Aus der Verlagerung des Experiments in eine Laborumgebung ergibt sich eine Lösung von äußeren, nicht akustischen Einflüssen der Konzerträume sowie die Möglichkeit an einem Ort beliebig viele akustische Umgebungen für die Versuche zu verwenden. Außerdem wurde es möglich mehrere Musiker in die Versuche einzubinden und zwei Musikstücke unterschiedlicher Tempi zu untersuchen.

Eine Beziehung zwischen Nachhallzeit und Tempo konnte in beiden Studien nachgewiesen werden. Allerdings stellte sich heraus, dass die Musiker individuell verschieden auf unterschiedliche akustische Umgebungen reagieren. So findet zwar grundsätzlich eine Anpassung des Tempos an die Umgebung statt, sie geschieht jedoch auf unterschiedliche Weise. Die Dynamik dagegen sowie die Klangfarbe stellten sich, bei unterschiedlichen Musikern und Musikstücken, als homogener abhängig von raumakustischen Parametern dar. (Schärer Kalkandjiev und Weinzierl, 2013b)

Der im Rahmen dieser Masterarbeit zu entwerfende Versuchsaufbau soll nun der Fragestellung dienen, in wie weit die Raumakustik auch das Zusammenspiel von mehreren Musikern beeinflusst. In Schärer Kalkandjiev und Weinzierl (2013b) hat sich gezeigt, dass eine von der realen Konzertumgebung losgelöste Laborsituation mit einer Untersuchung der Darbietungen eine wirkungsvolle Methode zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen musikalischer Interpretation und Raumakustik darstellt.

²Binaural Room Impulse Response

Wie bereits beschrieben, bietet die Möglichkeit entsprechende Versuche durchzuführen große Vorteile gegenüber Feldexperimenten, da die akustische Umgebung, wenn nötig, unmittelbar verändert werden kann. Außerdem werden die Merkmale verschiedener akustischer Umgebungen von anderen Reizen, wie der visuellen Wahrnehmung isoliert. Es hat sich gezeigt, dass die binaurale Synthese akustischer Umgebungen ein geeignetes Mittel zur Durchführung von Hörversuchen darstellt (Lindau, 2014) und die Umgebungen von Probanden trotz möglicher Abweichungen von realen Schallquellen als plausibel angesehen werden (Lindau und Weinzierl, 2012). Dabei müssen die verwendeten BRIRs nicht durch Messungen in realen Umgebungen gewonnen werden, sondern können auch durch Computersimulationen generiert werden. Für diesen Fall haben Moldrzyk et al. (2005) gezeigt, dass, wenn kein unmittelbarer Vergleich zur realen akustischen Umgebung besteht, eine simulierte Umgebung von einer Mehrzahl an Versuchsteilnehmern nicht von einer realen Umgebung unterschieden werden kann.

Die aktuellen Ansätze Computermodelle zu auralisieren basieren auf hybriden Verfahren, bei denen deterministische und stochastische Methoden kombiniert werden, um jeweils frühe Reflexionen und den nachfolgenden Nachhall zu berechnen (Schröder, 2011). Die Raumakustik-Simulationssoftware Raven der RWTH Aachen verwendet hierfür die deterministische Spiegelschallquellen Methode und stochastisches Ray-Tracing (Schröder und Vorländer, 2011). Aus diesen können auf effiziente und hochauflösende Weise Raumimpulsantworten berechnet werden. Diese können bei einer Einbindung von kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (HRTF³) auch in binauralem Format ausgegeben und so für eine Auralisation genutzt werden.

Raven ist als Plugin für SketchUp ausgeführt. Durch die Integration in die CAD-Software und den daraus resultierenden, einfachen Möglichkeiten der Modifikation am Modell sowie die direkte visuelle Ausgabe von Berechnungsergebnissen in Sketchup wird die Arbeit mit der Simulationssoftware beschleunigt. Zudem kann die Simulation direkt aus Sketchup heraus binaural auralisiert werden. (Aspöck et al., 2014) Eine Schnittstelle für Matlab, mit dessen Hilfe Skripte für Berechnungen in Raven ausgeführt werden können, unterstützt die Automatisierung und Vereinfachung von wiederkehrenden Berechnungsabläufen in Raven.

4 Methode und Quellen

Die zu entwickelnde Versuchsumgebung kann in zwei Teilbereiche gegliedert werden. Den ersten Komplex bildet die Erstellung der für den Versuch benötigten virtuellen akustischen Umgebungen mit Hilfe der Berechnung entsprechender BRIRs. Der zweite Teil besteht im Aufbau des Laborversuchs. Hier wird ein geeigneter Aufbau der Aufnahme- und Wiedergabekette, der von den Musikern aufgenommenen Signale und deren Integration in die virtuelle Umgebung realisiert.

³Head Related Transfer Function

4.1 Berechnung der virtuellen akustischen Umgebungen

Für die Erstellung der VAEs werden 14 Raummodelle verwendet, welche für den Versuchsaufbau in Schärer Kalkandjiev und Weinzierl (2013b) ausgewählt und modelliert wurden. Die realen Räumen nachempfundenen Modelle bilden eine große Bandbreite unterschiedlicher Parameter der Raumakustik ab (Schärer Kalkandjiev und Weinzierl, 2013b). Die Modelle wurden in einer vorangegangenen Arbeit am Fachgebiet AKT⁴ in SketchUp umgesetzt (Ackermann und Ilse, 2015) und stehen für diese Arbeit zur Verfügung.

In den Modellen müssen die Positionen der Musiker und die Ausrichtung ihrer Instrumente festgelegt werden. Hier ist eine Positionierung zu wählen, die auch im Labor umgesetzt werden kann. Um eine plausible Auralisation zu erreichen, sollten die Positionen sowohl im Computermodell als auch im Versuchsaufbau gleich sein. Ihre Ausrichtung ist von entscheidender Bedeutung, da die natürlichen Richtcharakteristiken der Instrumente implementiert werden. Ebenso müssen die möglichen Freiheitsgrade der Bewegung der Musiker festgestellt und beurteilt werden. Hier ist die Balance zwischen einer glaubhaften Auralisation für die Musiker auf Grund ihrer hörtypischen (Thurlow et al., 1967) und maximalen Kopfbewegungen (Schöps et al., 1997) und der Anzahl an nötigen Berechnungen zu finden, welche mit größeren Freiheitsgraden von Kopf- und Torsobewegungen ansteigt. Die nötige Winkelauflösung von binauralen Raumimpulsantworten wird in Lindau et al. (2008) beziffert.

Für die Berechnung von BRIRs werden in der Simulationssoftware Raven HRTFs mit einbezogen. Hier ist auf eine Kompatibilität mit allgemein (Brinkmann et al., 2013) und individuell gemessenen Übertragungsfunktionen zu achten. Musiker bewegen sich gewohnheitsgemäß beim Musizieren mit ihrem Instrument passend zur Musik oder um z. B. Blickkontakt mit den anderen Musikern im Ensemble aufzunehmen. Die Berechnungen der BRIRs müssen also für horizontale und vertikale Ausrichtungen der Empfänger berechnet werden. Da Popko (2013) zeigen konnte, dass auch die Kopf-über-Torso-Orientierung (HATO⁵) einen großen Einfluss auf die HRTF hat, könnte die horizontale Ausrichtung des Empfängers für diesen Versuch durch die Gewinnung von BRIRs mittels HATOs realisiert werden. Diese kommen den zu erwartenden Bewegungen der Musiker auch am nächsten. Es ist damit zu rechnen, dass beim Musizieren im Sitzen eher der Kopf, als der gesamte Oberkörper gedreht wird. Auch hier ist zu klären, welche Freiheitsgrade für den Versuchsausbau benötigt werden und welcher Rechenaufwand dadurch zu Stande kommt. Minnaar et al. (2005) zeigen welche gemessenen oder berechneten Winkelauflösungen nötig sind, um ohne hörbare Unterschiede zwischen den einzelnen Übertragungsfunktionen interpolieren zu können. Dies würde den Rechenaufwand für die Computersimulation verringern.

Zur effizienten Berechnung der BRIRs für alle Freiheitsgrade wird, wie in Ackermann und Ilse (2015) beschrieben, das Animationsmodul von Raven benutzt, um den virtuel-

⁴Audiokommunikation und -technologie

⁵Head Above Torso Orientation

len binauralen Empfänger im Raum zu drehen. Das Modul ermöglicht die Berechnung des Schallfeldes für mehrere Positionen und Orientierungen von Quellen und Empfängern. Die Ansteuerung des Moduls und aller von Raven zur Verfügung stehenden Parameter geschieht über ein Matlab Skript, welches im Rahmen dieser Arbeit entworfen wird. Auch die Simulation für alle HATOs soll in diesem Skript realisiert werden. Raven simuliert für jede Position der Quellen und Empfänger einmalig das Schallfeld. Dieses wird für einen kugelförmigen Detektor an der Empfängerposition berechnet (Schröder, 2011). Die weitere Berechnung der BRIRs kann dann mit diesen Daten für alle Ausrichtungen des Empfängers an dieser Position durchgeführt werden. Für den hier zu entwerfenden Laboraufbau wird der Direktschall aus den berechneten BRIRs ausgeschlossen, da dieser im reflexionsarmen Raum direkt von den Instrumenten übertragen wird.

4.2 Laborversuch

Im Laborversuch soll für vier Musiker eine VAE realisiert werden, in der sie ohne direkte Einflüsse der verwendeten Technik musizieren können, um ihre Reaktion auf die sich verändernden akustischen Umgebungen unbeeinflusst beobachten zu können. Die wichtigsten Glieder der Aufnahme- und Wiedergabekette sind die Mikrofonierung, Signalübertragung, Echtzeit-Faltung der Signale mit den BRIRs und die Wiedergabe über über die Kopfhörer. Dazu kommt das Tracking der Kopfbewegung eines jeden Musikers.

Eine geeignete Mikrofonierung wurde bereits in Schärer Kalkandjiev und Weinzierl (2013b) entwickelt und soll hier zum Einsatz kommen. Ein Miniatur-Lavalier-Mikrofon mit omnidirektionaler Charakteristik vom Typ Sennheiser MKE 1 wird mit einer Drahthalterung im charakteristischen Hauptabstrahlwinkel des Instruments befestigt. Die Faltung der Signale in Echtzeit mit den binauralen Raumimpulsantworten soll auf leistungsstarken Computern mit der Software fWONDER⁶ ausgeführt werden. Die Wiedergabe geschieht über extra-aurale Kopfhörer, welche durch ihre Bauweise den von den Instrumenten ausgehenden Direktschall kaum beeinflussen dürfen. Zudem erfüllen die Kopfhörer die Anforderungen von Møller (1992), nach denen die akustische Impedanz des Kopfhörers gleich der des Schallfeldes sein sollte. Die Wiedergabe über die Kopfhörer dient nur dazu, dem Schallfeld am Ohr des jeweiligen Musikers die zum simulierten Raum passenden frühen Reflexionen und den Diffusschallanteil hinzuzufügen. Der Direktschall erreicht die Musiker von den Instrumenten selbst. Daraus ergibt sich das Problem, den Pegel des wiedergegebenen Diffusschalls an den Direktschall der Instrumente anzupassen, um ein natürliches Verhältnis an der Hörposition sicher zu stellen. Hierfür muss eine geeignete Methode gefunden werden, das Verhältnis von Direkt- Diffusschall in der Computersimulation zu ermitteln und dieses im Labor auf den richtigen Wert einzumessen. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Akzeptanz der simulierten akustischen Umgebung durch die Musiker ist die Gesamtlatenz des Systems.

⁶<http://sourceforge.net/projects/swonder/>

5 Arbeits- und Zeitplan

Aus der Aufnahme, Signalverarbeitung und Wiedergabe ergibt sich eine Latenz im Signal, welche nicht zu groß werden darf. Anhaltspunkte für Wahrnehmungsgrenzen von Latenzzeiten bei der Auralisation von virtuellen akustischen Umgebungen gibt Lindau (2009).

4.3 Evaluation

Im Versuchsablauf und nach Ausführung von Probedurchläufen, soll eine Evaluation der Eindrücke der Musiker zur Plausibilität der gemischten virtuellen und realen akustischen Umgebung durchgeführt werden. Hierzu wird ein entsprechender Interviewleitfaden erstellt nach dem die Musiker im Anschluss an den Versuch befragt werden. Dabei wird ihre Einschätzung zu den akustischen Gegebenheiten, der gesamten Versuchsumgebung und zum Versuchsablauf aufgenommen.

5 Arbeits- und Zeitplan

KW	Monat	Schriftlich	Coding	Praxis
45	Nov 14	Literaturrecherche	Einarbeitung Raven, Matlabanbindung, Evaluation SSR/WONDER	
46				
47				
48	Aufbereitung GRAP-Skript für eigene Arbeit			
49				
50	Dez 14		Matlab-Skript: Azimuth, Elevation HRTF	
51				
52				
1	Jan 15	Exposé verfassen	Matlab-Skript: Quellenpositionierung, S/R-Kombinationen, Interpolation HRTF/BRIR, Optimierung Usability	Vorbereitung Versuch: Freiheitsgrade/Winkeauflösung festlegen, Modelle berechnen
2				
3				
4				
5	Feb 15	Dokumentation für Masterarbeit		Fertigstellung Raven Modelle
6				
7				Testaufbau Labor
8				
9	März 15			Korrekturen
10				Versuchsaufbau RAR
11				
12	Apr 15	Schriftlicher Teil Masterarbeit		Evaluation
13				Auswertung Evaluation
14				
15				
16	Mai 15	Abgabe		
20				

Abbildung 1: Arbeits- und Zeitplan

Abkürzungsverzeichnis

BRIR	Binaural Room Impulse Response
HATO	Head Above Torso Orientation
HRTF	Head Related Transfer Function
VAE	Virtual Acoustic Environment

Literaturverzeichnis

- Ackermann, David und Maximilian Ilse (2015): *The Simulation of Monaural and Binaural Transfer Functions for a Ground Truth for Room acoustical Analysis and Perception (GRAP)*. Masterarbeit (laufend), Technische Universität, Fakultät I, Fachgebiet Audiokommunikation, Berlin.
- Aspöck, Lukas; Sönke Pelzer; Frank Wefers und Michael Vorländer (2014): „A Real-Time Auralization Plugin for Architectural Design and Education.” In: *Proc. of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*. Berlin, S. 156–161.
- Bolzinger, S; O Warusfel und E Kahle (1994): „A study of the influence of room acoustics on piano performance.” In: *Journal de Physique IV, Colloque C5, supplément au Journal de Physique III 4* S. 617–620.
- Brinkmann, Fabian; Alexander Lindau; Stefan Weinzierl; Gunnar Geissler und Steven van de Par (2013): „A high resolution head-related transfer function database including different orientations of head above the torso.” In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 39. DAGA*. Merano, Italy, S. 596–599.
- Kato, Kosuke; Kanako Ueno und Keiji Kawai (2007): „Musicians Adjustment of Performance to Room Acoustics Part II: Acoustical Analysis of Performed Sound Signals.” In: *Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics*, vol. 19.
- Kato, Kosuke; Kanako Ueno und Keiji Kawai (2008): „Musicians‘ Adjustment of Performance to Room Acoustics, Part III: Understanding the Variations in Musical Expressions.” In: *Proc. of Acoustics 08*. S. 4533–4538.
- Lindau, Alexander (2009): „The Perception of System Latency in Dynamic Binaural Synthesis.” In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 35. DAGA*, vol. 3. S. 1063–1066.
- Lindau, Alexander (2014): *Binaural Resynthesis of Acoustical Environments. Technology and Perceptual Evaluation*. Dissertation, Technische Universität, Fakultät I - Geisteswissenschaften, Berlin.
- Lindau, Alexander; Hans-Joachim Mempel und Stefan Weinzierl (2008): „Minimum BRIR grid resolution for dynamic binaural synthesis.” In: *Proc. of the Acoustics 08*. Paris, France, S. 3851–3856.
- Lindau, Alexander und Stefan Weinzierl (2012): „Assessing the Plausibility of Virtual Acoustic Environments.” In: *Acta Acustica united with Acustica*, 98(5) S. 804–810.
- Minnaar, Pauli; Jan Plogsties und Flemming Christensen (2005): „Directional resolution of head-related transfer functions required in binaural synthesis.” In: *J. Audio Eng. Soc*, 53(10) S. 919–929.

- Moldrzyk, Christoph; Tobias Lentz und Stefan Weinzierl (2005): „Perzeptive evaluation binauraler Auralisationen.” In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 31. DAGA*, vol. 31 (2). München, S. 545–546.
- Møller, Henrik (1992): „Fundamentals of Binaural Technology.” In: *Applied Acoustics*, 36(3) S. 171–218.
- Popko, Reinhild (2013): *Zur Hörbarkeit und Interpolation von Kopf-über-Torso-Orientierungen bei Aufnahmen mit einem Kopf-und-Torso-Simulator*. Bachelorarbeit, Technische Universität, Fakultät I, Fachgebiet Audiokommunikation, Berlin.
- Schärer Kalkandjiev, Zora und Stefan Weinzierl (2013a): „The influence of room acoustics on solo music performance: An empirical case study.” In: *Acta Acustica united with Acustica*, 99(3) S. 433–441.
- Schärer Kalkandjiev, Zora und Stefan Weinzierl (2013b): „Room acoustics viewed from the stage: Solo performers’ adjustments to the acoustical environment.” In: *Proc. of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*. Toronto, Canada.
- Schöps, P; N Seichert; M Schenk; U Petri und E Senn (1997): „Alters- und geschlechts-spezifische Bewegungsausmaße der Halswirbelsäule.” In: *Physikalische Medizin, Rehabilitationsmedizin, Kurortmedizin*, 7(03) S. 80–87.
- Schröder, Dirk (2011): *Physically Based Real-Time Auralization of Interactive Virtual Environments*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Aachen.
- Schröder, Dirk und Michael Vorländer (2011): „RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments.” In: *Forum Acusticum 2011*. Aalborg, Denmark, S. 1541–1546.
- Thurlow, Willard R.; John W. Mangels und Philip S. Runge (1967): „Head Movements During Sound Localization.” In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42(2) S. 489–493.
- Ueno, Kanako; Kosuke Kato und Keiji Kawai (2010): „Effect of Room Acoustics on Musicians’ Performance. Part I: Experimental Investigation with a Conceptual Model.” In: *Acta Acustica united with Acustica*, 96 S. 505–515.
- Von Békésy, Georg (1968): „Feedback phenomena between the stringed instrument and the musician.” In: *The Rockefeller University Review*, 6.