Virtuelle Konzerträume als Versuchsumgebung für Musiker

Christoph Böhm[1], Zora Schärer Kalkandjiev[1], Stefan Weinzierl[1]
[1] *Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, 10587 Berlin, Deutschland*
Email: christoph.boehm@campus.tu-berlin.de, zora.schaerer@tu-berlin.de, stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Einleitung

Für die raumakustische Forschung spielen die Möglichkeiten der Computersimulation und der virtuellen Akustik eine wichtige Rolle. Sie ermöglichen die Durchführung von Versuchen, bei denen Hörer direkt nacheinander in verschiedene akustische Umgebungen versetzt werden können. In diesem Zusammenhang wurde ein technisches Verfahren zur Erstellung von virtuellen Konzerträumen für aktive Musiker mit Hilfe der dynamischen Binauralsynthese entwickelt. Ein Ensemble von vier Musikern kann dabei in virtuellen akustischen Umgebungen zusammenspielen, wodurch vielfältige Untersuchungen ermöglicht werden, etwa zur Wahrnehmung von Raumakustik während des Musizierens oder zum Einfluss der Raumakustik auf die musikalische Interpretation.

Die entwickelte Versuchsumgebung teilt sich in zwei Teilbereiche auf: Zunächst werden für ausgewählte Modelle in der Simulations- und Auralisations-Software RAVEN [1] binaurale Raumimpulsantworten für jede Kombination aus Schallquelle und Empfänger der virtuellen akustischen Umgebung berechnet. Im zweiten Schritt dient ein technischer Aufbau zur Auralisation der Raumantwort, welche durch die Faltung der nachallfreien Quellsignale der Instrumente mit den zuvor berechneten Raumimpulsantworten synthetisiert wird. Der Direktschall erreicht die Musiker dabei unmittelbar von ihrem Instrument. Um einen Einfluss des Raumes auf den Direktschall zu unterbinden, ist die Versuchsumgebung deshalb auf die Nutzung im reflexionsarmen Raum ausgelegt.

Konzeption der virtuellen Umgebungen

Die Simulations-Software RAVEN verwendet die CAD-Software SketchUp als grafisches Frontend. Mit dieser Software wurden zunächst Raummodelle von 14 Aufführungsstätten erstellt. Dabei wurde auf die bereits von Schärer Kalkandjiev und Weinzierl [2][3] verwendeten Modelle und Daten zurückgegriffen. Die Räume stellen typische Aufführungsorte für westeuropäische Kunstmusik dar. Sie orientieren sich an existierenden Räumen und bilden eine große Bandbreite unterschiedlicher architektonischer und raumakustischer Bedingungen ab.

Für eine realitätsnahe Implementierung der Schallquellen im Modell wurden typische Positionen von Musikern in einem Streichquartett in den Modellen umgesetzt. Dabei wurden im Modell dieselben Positionen verwendet, die später auch in der realen Versuchsumgebung zum Einsatz kamen (Abb. 2).

Für alle Quellen wurden passende Richtcharakteristiken

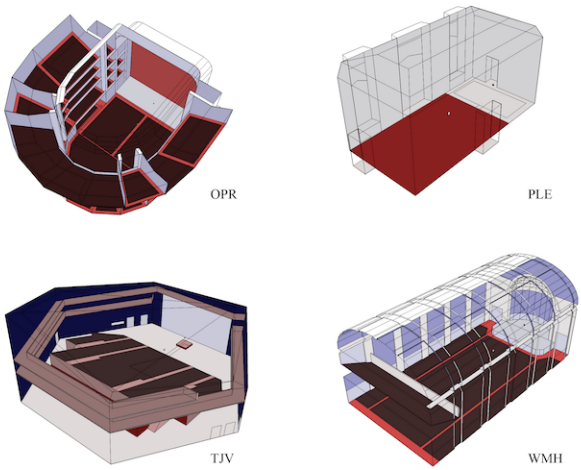

Abbildung 1: Exemplarische Auswahl der verwendeten Raummodelle

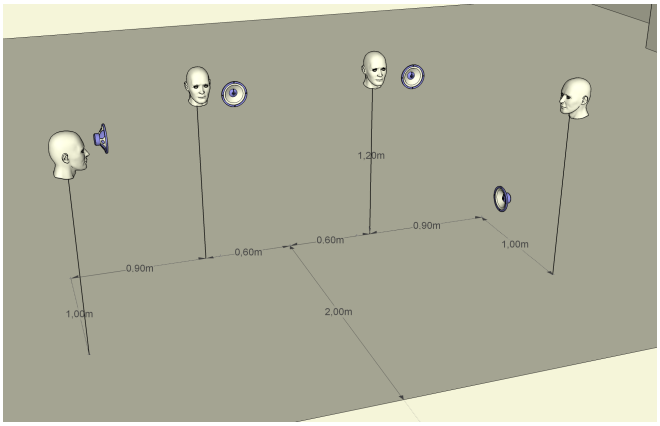

Abbildung 2: Quell- und Empfängerpositionen im Modell und der Versuchsumgebung

aus dem Datensatz von Pollow et al. [4] implementiert. Auf der Empfängerseite kam der HRTF-Datensatz des FABIAN Kunstkopf-Torso-Simulators [5] zum Einsatz.

Um den Musikern ausreichende Bewegungsfreiheit in der virtuellen akustischen Umgebung zu ermöglichen, wurden bei der Berechnung der BRIR-Datensätze Freiheitsgrade von $\pm 50°$ im Azimut und $-30°$ bis $+20°$ in der Elevation für die Kopfausrichtung berücksichtigt. Diese Wertebereiche wurden mit $2°$ für beide Freiheitsgrade aufgelöst, wodurch bei musikalischem Inhalt auch für kritische Hörer eine plausible Auralisation ohne hörbare Diskretisierung bei der Kopfbewegung erreicht werden kann [6].

BRIR-Berechnung

Für vier gemeinsam spielende Musiker ergeben sich 16 Quell- und Empfängerkombinationen. Für jeden dieser Schallübertragungspfade ist ein eigener BRIR-Datensatz zu berechnen. Für die beschriebenen Freiheitsgrade für Kopfbewegungen in der dynamischen Binauralsynthese ergeben sich daraus 297024 Berechnungen bei 14 verschiedenen virtuellen Umgebungen. Um eine solche Anzahl an Simulationen effizient berechnen zu können ist eine Automation der Berechnungen notwendig. Diese Automation erlaubt außerdem den wiederholten Einsatz der Versuchsumgebung mit neuen Modellen, Richtcharakteristiken und Quell-/Empfängerpositionen.

RAVEN bietet für die Automation eine Schnittstelle, um alle Berechnungen an zuvor erstellten Modellen aus Matlab heraus zu steuern. Sämtliche Parameter der Simulation bis hin zu den Quell- und Empfängerpositionen können definiert und übergeben werden. Die eigentliche Simulation findet anhand dieser Parameter in RAVEN statt.

Es wurde eine Matlab-Routine entwickelt, die es dem Benutzer ermöglicht, für mehrere Raummodelle Berechnungen von BRIRs mit beliebigen Ausrichtungen des Empfängers an fester Position im Raum durchzuführen. Sämtliche Parameter der Simulation können im Skript definiert werden. Somit werden die Quell- und Empfängerpositionen, die Richtcharakteristiken sowie alle Parameter der Simulation, wie z.B. die Anzahl der Strahlen des Ray Tracings und die Ordnung der Spiegelschallquellenmethode für alle Raummodelle festgelegt. Die Benutzereingaben sind ausschließlich auf die Wahl der Parameter ausgelegt. Die eigentliche Berechnung findet automatisiert statt, um die Handhabung zu vereinfachen. Zur individuellen Verwendung und Weiterverarbeitung der Datensätze wurde zudem der Export verschiedener Datenformate implementiert.

Versuchsaufbau

Zur Auralisation wurde für einen reflexionsarmen Raum als Laborumgebung ein technischer Versuchsaufbau entwickelt, bei dem der Direktschall der Instrumente die Musiker durch die Verwendung von extra-auralen Kopfhörern nahezu ungehindert erreicht. Die Raumantwort wird durch dynamische Binauralsynthese der Instrumentensignale mit den zuvor berechneten und vom Direktschall-Anteil befreiten BRIRs dem Schallfeld am Ohr der Musiker in Echtzeit hinzugefügt.

Zur Aufnahme der Quellsignale werden an den Instrumenten befestigte Miniatur-Lavalier-Mikrofone verwendet (Abb. 4). Die aufgenommenen Signale werden nach Verstärkung und A/D-Wandlung auf einem Computer weiterverarbeitet. Zur Wiedergabe wird das Ausgangssignal der Soundkarten über Kopfhörerverstärker zu den extra-auralen Kopfhörern geführt. An den Kopfhörern befestigte Head-Tracker ermitteln die Kopfposition für die dynamische Binauralsynthese (Abb. 3).

Für die interne Signalverarbeitung wird für jeweils zwei Musiker ein Computer mit externer Soundkarte verwendet. Mit Hilfe von zuvor gemessenen Übertragungsfunktionen und daraus entwickelten Filtern ($h_{Mikrofon_EQ}$, $h_{Kopfhoerer_EQ}$) werden sowohl die Frequenzgänge der Mikrofone als auch die der Kopfhörer entzerrt (Abb. 3).

Die eigentliche Faltung des Quellsignals mit der zur Kopfposition passenden BRIR wird durch die Software Sound Scape Renderer [7] realisiert. Für die Signalverteilung zwischen den einzelnen Softwareprodukten wird der Linux-Soundserver Jack verwendet.

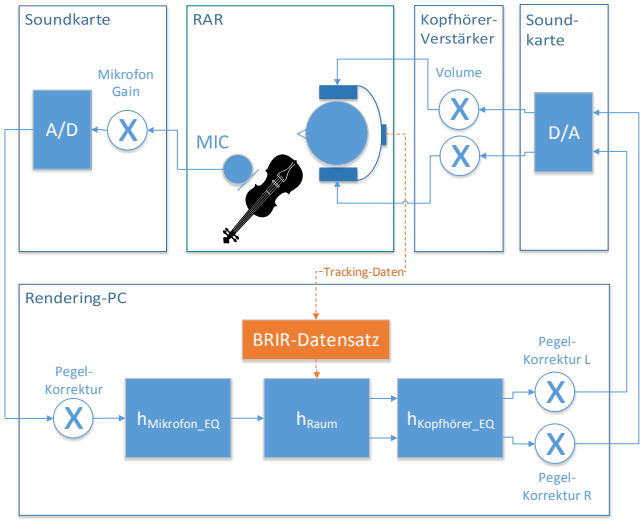

Abbildung 3: Signalverarbeitung im Versuchsaufbau

Der Einsatz von leistungsfähigen Computersystemen ermöglicht den Einsatz des Auralisations-Systems in Echtzeit. Zur Verifikation wurde die Latenz des Systems ermittelt, die sich auf 52 ms beläuft. Durch gezieltes Kürzen der Samples am Anfang der Raumimpulsantworten bis zur ersten Amplitudenänderung durch die erste Reflexion konnte sie zusätzlich um 10 ms verringert werden und liegt somit unterhalb der durch Lindau [8] ermittelten unteren Wahrnehmungsgrenze.

Elementar für die mit der Versuchsumgebung untersuchten Fragestellung ist ein schneller Wechsel zwischen unterschiedlichen virtuellen Umgebungen. Dieser wird durch das gemeinsame Laden aller BRIRs in den Arbeitsspeicher mittels des Sound Scape Renderers und eine Umschaltung zwischen den BRIRs mittels Jack-Audio-Routing ermöglicht. Alle computergestützten Berechnungen werden mit Hilfe der Programmierung von Skripten automatisiert, um den späteren Einsatz der Umgebung mit ihrer komplexen Softwarestruktur in Hörversuchen zu erleichtern.

Kalibrierung

Für das Hinzufügen der Raumantwort zum Direktschall mit Hilfe der Auralisation ist eine präzise Kalibrierung des Wiedergabepegels erforderlich. Zunächst müssen alle vier verwendeten Kopfhörer denselben Ausgangspegel aufweisen. Außerdem muss der Pegel der auralisierten Raumantwort an das reale Direktschallsignal angepasst

werden, damit ein korrektes Verhältnis zwischen diesen beiden Anteilen der BRIR gegeben ist. Hierfür wird der Pegel des Direktschalls für jedes Instrument mit einem Kunstkopf mit aufgesetzten Kopfhörern gemessen. Der Musiker spielt hierfür eine Tonfolge über alle Lagen, um den Fehler in der Kalibrierung, der durch unterschiedliche Richtcharakteristiken von realen und simulierten Instrumenten in den verschiedenen Frequenzbereichen entsteht, zu minimieren. Die Messung wird einmal für den Direktschall des Instruments im realen Schallfeld und einmal durch die Wiedergabe des Direktschalls über die Auralisation durchgeführt. Für letztere kommt für den Kunstkopf eine für seine Position berechnete, nachhallfreie BRIR zum Einsatz. Aus der Differenz der Pegel des realen und des auralisierten Direktschalls ergibt sich der Anpassungswert für die Aussteuerung der Wiedergabe. In Hinblick auf diese Referenz-Situation wurde bereits bei der Simulation darauf geachtet, dass die binauralen Raumimpulsantworten die relativen Amplituden in den verschiedenen Raummodellen korrekt widerspiegeln und sie nicht etwa durch eine häufig angewandte Normalisierung dekalibriert werden.

Evaluation

In einem ersten Vorversuch wurden der technische Aufbau, die Abläufe, die Kalibrierung der Signalpegel und die Rezeption der virtuellen akustischen Umgebung durch die Musiker evaluiert. Hierfür wurden die Musiker bei einem kompletten Versuchsdurchlauf zu den auralisierten Umgebungen befragt. Dabei wurden Fragen zur Wahrnehmung der Räume und ihrer Spielweise sowie zu Artefakten und technischen Einflüssen gestellt.

Es zeigte sich, dass Musiker die akustische Situation als realitätsnah wahrnehmen und einen hohen Grad an Immersion in die virtuelle Umgebung erleben. Artefakte oder Störungen in der Auralisation wurden nicht wahrgenommen. Die Musiker beschrieben die Räume mit Begriffen aus ihrer eigenen Konzerterfahrung und zeigten klare Präferenzen für einzelne Umgebungen. Sie konnten zudem einen direkten Bezug zwischen ihrer musikalischen Interpretation und der Raumakustik herstellen und verbalisieren.

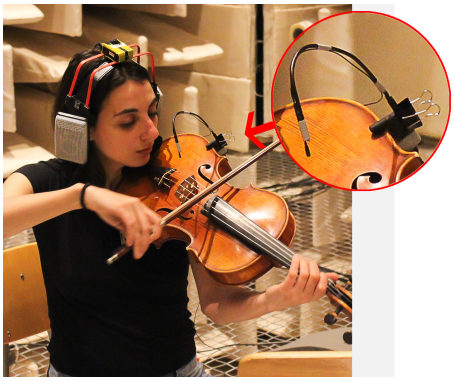

Abbildung 4: Musikerin während des Vorversuchs mit Detailabbildung der Mikrofonhalterung

Ergebnis

Im Ergebnis konnte eine Versuchsumgebung geschaffen werden, die eine technisch korrekte und plausible Auralisation von virtuellen Konzerträumen und somit Versuche zur Wahrnehmung von akustischen Umgebungen ohne Bindung an reale Räume ermöglicht. Die weitgehende Automation, die einen Versuchsablauf ohne manuelle Eingriffe an Hard- und Software ermöglicht, unterstützt den Versuchsablauf. Das System ist für Versuche mit einer beliebigen Anzahl an akustischen Umgebungen und musikalischen Interpreten skalierbar.

Literatur

[1] 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.

[2] Schärer Kalkandjiev, Zora und Stefan Weinzierl (2013): „The influence of room acoustics on solo music performance: An empirical case study." In: *Acta Acustica united with Acustica*, 99(3) S. 433–441.

[3] Schärer Kalkandjiev, Zora und Stefan Weinzierl (2015): „The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performance: An Experimental Study." In: *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain, Advance online publication.* http://dx.doi.org/10.1037/pmu0000065.

[4] Pollow, Martin; Gottfried K Behler und Frank Schultz (2010): „Musical instrument recording for building a directivity database." In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 36. DAGA.*

[5] 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.

[6] Lindau, Alexander und Stefan Weinzierl (2009). "On the spatial resolution of virtual acoustic environments for head movements in horizontal, vertical and lateral direction." In: *EAA Symposium on Auralization*, Helsinki, 1–6.

[7] Geier, Matthias; Jens Ahrens und Sascha Spors (2008): „The Sound Scape Renderer: A Unified Spatial Audio Reproduction Framework for Arbitrary Rendering Methods." In: *Audio Engineering Society Convention 124, 7330.* Amsterdam, The Netherlands.

[8] Lindau, Alexander (2009): „The Perception of System Latency in Dynamic Binaural Synthesis." In: *Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 35. DAGA.* Rotterdam, S. 1063–1066.