



DIE HIMMELSBURG – AURALISATION EINER KANTATE VON J. S. BACH IN DER DIGITAL REKONSTRUIERTEN KAPELLE DES WEIMARER STADTSCHLOSSES

Christoph Böhm^{1,2}, Stefan Weinzierl³

¹ Technische Universität Berlin, Deutschland, E-Mail: c.boehm@tu-berlin.de

² Akustik-Ingenieurbüro Moll GmbH, Deutschland, E-Mail: boehm@mollakustik.de

³ Technische Universität Berlin, Deutschland, E-Mail: stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Kurzfassung

Mit aktueller VR-Technik und geeigneten Inhalten ergeben sich neue Möglichkeiten, nicht mehr oder noch nicht vorhandene Räume virtuell zum Leben zu erwecken und sie visuell, akustisch und teilweise haptisch erfahrbar zu machen. Dieser Beitrag stellt die digitale Rekonstruktion der „Himmelsburg“ vor, der 1774 zerstörten Kapelle des Weimarer Stadtschlosses, die zeitweise Wirkungsstätte J. S. Bachs war. In der VR-Rekonstruktion können Nutzer die Uraufführung einer in der Himmelsburg uraufgeführten Kantate Bachs in einer virtuellen Umgebung mit originalgetreuer Akustik nachempfinden und den Raum interaktiv erkunden. Der Beitrag beschreibt die hierfür notwendigen technischen Verfahren sowie die musikalischen Aufnahmen und die Präsentation.

With current VR technology and suitable content, new possibilities arise to bring rooms that no longer or not yet exist to life virtually and to give users the opportunity to experience the rooms visually, acoustically and partly haptically. This article presents the digital reconstruction of the “Himmelsburg”, the chapel of the “Weimarer Stadtschloss” that burned down as early as 1774 and was at that time the place where J. S. Bach was active. In the VR reconstruction, users can experience the premiere of a Bach cantata in a virtual environment with accurate acoustics and can interactively explore the space. The article describes the technical processes required for this as well as the musical recordings and the presentation.

Einleitung

Die im Jahr 1630 geweihte Kapelle des Weimarer Stadtschlosses ist aus zwei Gründen von besonderem historischem Interesse. Zum einen aufgrund ihrer ungewöhnlichen Architektur: eines mehrstöckigen Aufbaus, der pyramidenförmig auf eine in 20 m Höhe befindliche Galerie zulief, welche durch ein großes Oberlicht mit dem Kirchenraum verbunden war. Die Galerie bot Platz für die Orgel und ein musikalisches Ensemble, dessen Klang die Kirchengemeinde somit von oben „wie aus dem Himmel“ erreichte, was der Kapelle den Beinamen „Himmelsburg“ einbrachte.

Zum anderen aufgrund der Tatsache, dass der junge Johann Sebastian Bach (1685–1750) hier von 1708 bis 1717 als Organist und Kapellmeister tätig war. Zu seinen Aufgaben gehörte es, alle vier Wochen eine Kirchenkantate auf den jeweiligen Sonntag zu komponieren. Das erste dieser Werke war die Kantate „Himmelskönig, sei willkommen“, die am 25. März 1714 in der Himmelsburg uraufgeführt wurde (Jung 1985).

Im Jahre 1774 wurde die Kapelle und Teile des Stadtschlosses durch einen Brand vollständig zerstört. Ziel des hier vorgestellten Projektes war es daher, diesen „mythischen Bach-Ort“ (Presseportal 2022) fast 250 Jahre nach seinem historischen Verlust durch eine digitale 3D-Rekonstruktion und die Auralisation der Himmelskönig-Kantate am Ort der Uraufführung wieder akustisch und visuell erlebbar zu machen.

In Kooperation der Autoren mit dem Fachgebiet Digitale Medien und Gestaltung der Fachhochschule Erfurt wurde eine virtuelle Umgebung für die Wiedergabe mit Head Mounted Displays und Binauralsynthese mit Kopfhörern entwickelt, die in einer mobilen Ausstellung zum Einsatz kommt. Der vorliegende Beitrag behandelt insbesondere den Prozess der Auralisation, d. h. der „Hörbarmachung“ der Akustik, von der Produktion des Audio-Contents bis zur Simulation des Schallausbreitung im modellierten Kirchenraum. Ein Schwerpunkt liegt auf Techniken und Erfahrungen, die sich über dieses konkrete Projekt hinaus auch auf andere historische Rekonstruktionen oder auch noch in der Planung befindliche Bauten übertragen lassen.

Methoden

Für die Installation der virtuellen Himmelsburg hat sich der Veranstalter frühzeitig für eine personalisierte VR-Umgebung mit mehreren Head Mounted Displays und Kopfhörern entschieden. Als Entwicklungsplattform diente die Game Engine Unity, mit der dreidimensionale Inhalte nicht nur für alle gängigen VR-Headsets erzeugt werden können, sondern die über Plugins auch für die binaurale Wiedergabe optimierte,

mit externen Tools erzeugte Audioinhalte in der virtuellen Umgebung einbinden kann.

Die Schallausbreitung im Raum wurde durch eine raumakustische Simulation berechnet, bei der akustische Übertragungsfunktionen von Schallquellen mit definierter Position und Abstrahlcharakteristik zu verschiedenen Hörerplätzen im Raum berechnet werden können. Die Wiedergabe erfolgt als Auralisation durch dynamische Binauralsynthese. Hierbei wird ein zuvor nachhallfrei aufgezeichnetes Audiosignal in Echtzeit mit den in der raumakustischen Simulation berechneten binauralen Raumimpulsantworten (BRIR) gefaltet und per Kopfhörer wiedergegeben. In einer für den individuellen Hörer optimierten Form kann die dynamische Binauralsynthese ein selbst im direkten Vergleich von der akustischen Realität nicht unterscheidbares Hörereignis erzeugen (Brinkmann et al. 2017b). Selbst in der hier umgesetzten, nicht-individuellen Form kann jedoch ein plausibles, d. h. nicht als Simulation erkennbares Hörereignis entstehen (Lindau und Weinzierl 2012). Um dies zu erreichen, müssen die für die Simulation vorgesehenen Audioinhalte vorab in einer nachhallfreien Umgebung aufgezeichnet werden. Diese Arbeitsschritte (Aufnahme, Simulation, Auralisation) sind im Folgenden näher beschrieben.

Musikauswahl und Audioaufnahmen

Die Kantate „Himmelskönig sei willkommen“ BWV 182 gilt als das erste Werk, das J. S. Bach in seiner neuen Funktion als Konzertmeister am Weimarer Hof komponierte. Sie wurde am Palmsonntag, den 25. März 1714 in der Weimarer Schlosskapelle uraufgeführt.

Für die akustische Rekonstruktion des Klangbilds in der Himmelsburg wurden daher die beiden ersten Sätze dieser Kantate als musikalische Inhalte ausgewählt, eine instrumental besetzte *Sonata* mit Blockflöte und Violine als Solostimmen und dem anschließenden Eingangschor (*Chorus*) über den Text „Himmelskönig, sei willkommen“. Für die Einspielung der Kantate konnte das Ensemble Cantus Thuringia & Capella unter Leitung von Bernhard Klapproth gewonnen werden.

Um die Aufnahmen als Audiomaterial für die Binauralsynthese verwenden zu können, müssen sie idealerweise nachhallfrei und ohne Übersprechen zwischen den Audiospuren produziert werden. Einerseits darf die Synthese der Kirchenakustik nicht hörbare Reste der räumlichen Signatur eines Aufnahmestudios enthalten; andererseits werden individuelle Übertragungsfunktionen für jede Quellposition zu jeder Hörposition berechnet, insofern würde durch ein Übersprechen der Violine in das Mikrofon der Blockflöte die Violine räumlich mehrdeutig abgebildet.

Um diese Anforderungen zu erfüllen und gleichzeitig dem Ensemble noch eine möglichst natürliche Spielsituation zu ermöglichen, wurde mit einem gruppenweisen Overdubbing aufgenommen, d. h. einer halbsequentuellen Aufnahme der Einzelspuren. Dies hatte sich bereits bei anderen, zum Teil noch wesentlich größer besetzten Produktionen bewährt (Böhm et al. 2021, Letellier et al. 2020), weil es – anders bei Einzelaufnahmen mit Clicktrack – den Musikern ein Zusammenspiel ermöglicht und, etwa in einer vollständigen Streicherbesetzung für den Lead Track, auch eine spontane Modulation des Tempos (Agogik). Erst bei den nachfolgenden Overdubs muss dann die Tempogestaltung des Lead Tracks übernommen werden.

Die musikalische Besetzung aus einer Blockflöte, zwei Violinen, zwei Violen, einem Violoncello, einem Kontrabass, Orgel und acht Vokalstimmen wurde daher in vier Gruppen aufgenommen, mit Gruppe 1 (VI I, Va I, Vc, Kb), Gruppe 2 (VI II, Va II), Gruppe 3 (Fl) und Gruppe 4 (Chor). Die Instrumente und Stimmen einer Gruppe wurden durch Trennwände separiert und als einzelne Audiospuren im reflexionsarmen Raum der TU Berlin aufgenommen (Abb. 1, Abb. 2). Der Raum bietet mit einer bespielbaren Fläche von 112 m², einem Volumen von 1750 m³ und einer unteren Grenzfrequenz für das nachhallfreie Verhalten von 63 Hz hervorragende Bedingungen für eine solche Aufnahme. Die Aufnahme der Orgel wurden als Sample-basierte Klangsynthese (Hauptwerk Software, www.hauptwerk.com) mit für eine Orgel der Bachzeit typischen Samples über ein Masterkeyboard gemeinsam mit Gruppe 1 eingespielt.

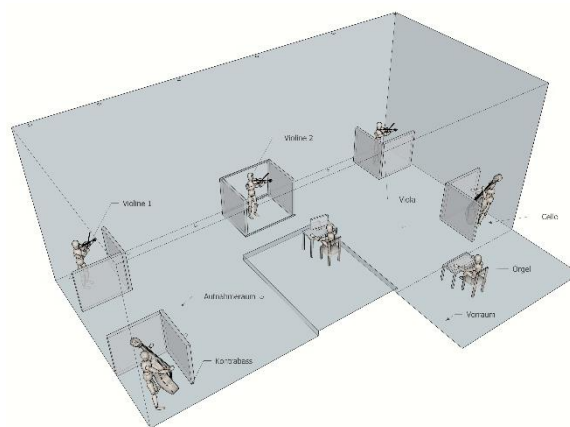


Abbildung 1: Aufnahmesetup im reflexionsarmen Raum der TU Berlin

Während der Aufnahme in der akustisch ungewohnten Umgebung konnte das Ensemble über Kopfhörer sich selbst, die Mitspieler und einen virtuellen Raum über einen jeweils individuell einstellbaren Mix hören. Wie bei konventionellen professionellen Musikproduktionen wurde in mehreren Takes produziert, sodass die Aufnahme durch Digital Editing durch einen Ton-

meister nachbearbeitet werden konnte, um Ungenauigkeiten im Spiel, leichte Unsynchronitäten und Intonationsfehler zu korrigieren, die durch die ungewöhnliche Produktionsweise zwangsläufig etwas größer sind als in einer normalen akustischen Umgebung.

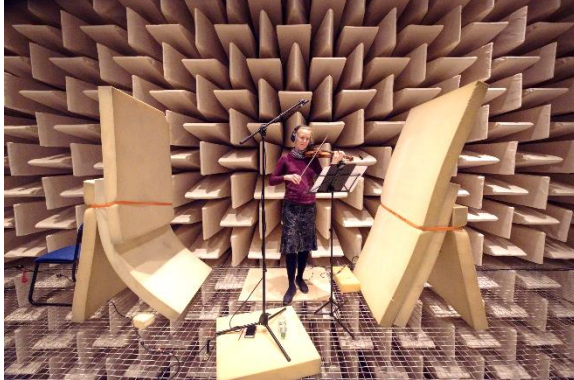


Abbildung 2: Aufnahmesituation im reflexionsarmen Raum der TU Berlin

Raumakustische Simulation

Um die Raumakustik der nicht mehr vorhandenen Himmelsburg rekonstruieren und wieder hörbar machen zu können, wurde eine Computersimulation der Raumakustik im dreidimensionalen Modell durchgeführt. Für diesen Zweck wurde die an der RWTH Aachen entwickelte Simulationssoftware RAVEN (Schröder 2011) eingesetzt. Die Numerik von RAVEN basiert auf dem Modell der geometrischen Akustik mit einem hybriden Berechnungsansatz. Hierbei wird eine Berechnung von Spiegelschallquellen für die Reflexionen früher Ordnung mit einem stochastischen Ray Tracing für das diffuse Schallfeld kombiniert. Auf diese Weise können Impulsantworten und raumakustische Parameter aus Energiehistogrammen berechnet werden, wobei sowohl die Richtcharakteristiken, also das richtungsabhängige Abstrahlverhalten der Quellen als auch kopfbezogene Übertragungsfunktionen (HRTFs) der Empfänger berücksichtigt werden.

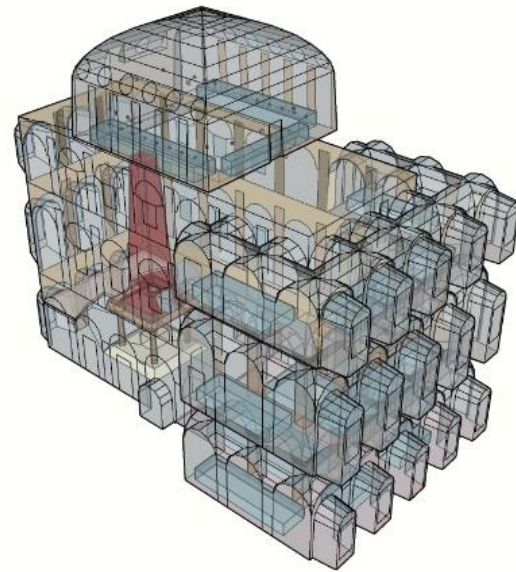


Abbildung 3: Dreidimensionales Modell der Himmelsburg für die akustische Simulation

Eingangsdaten für die Simulation sind die Raumgeometrie, die Oberflächeneigenschaften in Form von frequenzabhängigen Absorptions- und Streugraden, die Richtcharakteristiken der Quellen und Empfänger sowie deren exakte Position und Ausrichtung.

Das Modell und die Oberflächeneigenschaften basieren auf einer Diplomarbeit zur Akustik der Himmelsburg von Jörg Arnold (Arnold 2005). In dieser Arbeit wurde bereits ein dreidimensionales Modell inklusive der zugehörigen akustischen Materialeigenschaften der Oberflächen erstellt und durch eine Computersimulation mit der Software CATT Acoustic untersucht. Das Modell und die Materialeigenschaften konnten übernommen und für die aktualisierten Berechnungen in die Simulationsumgebung von RAVEN auf Grundlage eines SketchUp-Modells (Abb. 3) integriert werden. Für die Auralisation wurde hierbei ein mit Publikum besetzter Zustand angenommen, um der realen Aufführungssituation möglichst nahe zu kommen.

Für die Richtcharakteristiken der Quellen wurde ein an der TU Berlin erzeugter Datensatz verwendet (Weinzierl et al. 2017, Shabtai et al. 2017). Für die Erzeugung der binauralen Raumimpulsantworten (BRIRs) wurde eine Datenbank von Außenohrübertragungsfunktionen (Head-related Transfer Functions, HRTFs) des FABIAN Kunstkopfes verwendet (Brinkmann et al. 2017, Brinkmann et al. 2017a).

Für die dynamische Binauralsynthese werden BRIRs abhängig von der Kopfausrichtung benötigt. Mit RAVEN können Simulationen mittels der Programmierumgebung Matlab automatisiert durchgeführt werden. Mit einer hierfür entwickelten Routine (Böhm 2016) wurden BRIRs für Kopfrotationen in der horizontalen Ebene von -180°

bis 177° in 3° -Schritten berechnet, einer Auflösung, bei der keine Artefakte in der dynamischen Binaural-synthese mehr wahrnehmbar sind (Lindau et al. 2009). Auf eine Nachführung auf Kopfbewegungen in der vertikalen Ebene wurden in der finalen Installation verzichtet, um den Speicherbedarf zu reduzieren und weil sich die Auswirkungen auf die Plausibilität der Auralisation als gering erwiesen.

Es wurden insgesamt 6 Datensätze für 6 verschiedene Hörpositionen in der Kirche und für jeweils 13 Quellpositionen des musikalischen Ensembles berechnet, insgesamt also 78 Datensätze mit je 120 zweikanaligen BRIRs.

Wiedergabe

Als Entwicklungsumgebung für das VR-Erlebnis wurde die Game Engine Unity verwendet. Die visuellen Inhalte mit einem hoch aufgelösten dreidimensionalen Modell der Himmelsburg (Abb. 3, Abb. 6) wurde vom Fachgebiet Digitale Medien und Gestaltung der Fachhochschule Erfurt (Prof. Rolf Kruse) entwickelt. Für Unity sind zwar eine Reihe von Audio-Plugins verfügbar, welche in vereinfachter Form auch die Raumgeometrie und die akustischen Eigenschaften der Oberflächen berücksichtigen; keines dieser Produkte erlaubt jedoch einen Einblick in die dahinterliegenden numerischen Berechnungsmethoden. Zudem bestehen nicht die im vorherigen Abschnitt beschriebenen umfassenden Einflussmöglichkeiten auf die Eingangsdaten in Form von eigenen Richtcharakteristiken und frequenzabhängigen Streu- und Absorptionsgraden.

Aus diesen Gründen wurden vorab berechnete BRIR-Datensätze verwendet, zumal diese unabhängig von der vor Ort zur Verfügung stehenden Echtzeit-Rechenleistung eingesetzt werden können. Die damit erreichte Simulation mit drei Freiheitsgraden der Kopfbewegung erlaubt zwar keine Translation im virtuellen Raum; da auch das reale Hörerlebnis in der historischen Kirche in der Regel an einem festen Hörerplatz stattfand, schien diese Einschränkung vertretbar.

Da für Unity keine Audio-Plugins zur Faltung von BRIRs verfügbar waren, wurde für diese Anwendung ein neues Spatializer-Plugin mit dem Unity-Spatializer-SDK und der VAS Library (Resch 2019) programmiert, welches in der Lage ist, BRIR-Datensätze einzulesen und die BRIRs abhängig von der Kopfposition mit einem Audiostream in Echtzeit und mit geringer Latenz zu falten. Dies ist in mehreren Instanzen möglich, wodurch die Audiospuren aller 13 Quellen in Echtzeit mit den jeweils zur Kopfausrichtung passenden BRIRs verrechnet werden können. Im virtuellen Raum wurden 6 Hörpositionen definiert, für die zuvor berechnete BRIR Datensätze vor Programmbeginn geladen wurden, um dann während des Programmablaufs zwischen den Positionen hin und her springen zu können. Hierfür dient eine kleine Fernbedienung mit zwei Knöpfen.

Durch die direkte Integration des Audio-Renderings in Unity wurde ein System entwickelt, welches für den späteren Dauereinsatz und die Wartung der Wiedergabe-PCs Vorteile gegenüber einer getrennten Verarbeitung von Video- und Audio-Signalen bietet.

Wiedergegeben werden die Audiosignale über einen Kopfhörer (Beyerdynamic DT770), der per Audio-interface mit dem PC verbunden ist. Ein geschlossener Kopfhörer wurde verwendet, da mit Umgebungsgeräuschen bei der Vorführung zu rechnen ist, welche bestmöglich abgeschirmt werden sollen. Die Treiber der Kopfhörer wurden hierfür in ein neu entworfenes Gehäuse eingebaut, welches eine direkte Befestigung an dem für die optische Wiedergabe eingesetzten Vive Pro VR-Headset ermöglicht. Die innere Form des Gehäuses blieb dabei gleich, um auch die klanglichen Eigenschaften zu erhalten. Auf diese Weise konnte ein hochwertiger Kopfhörer verwendet werden, ohne dass dieser getrennt vom VR-Headset aufgesetzt werden musste (Abb. 4).



Abbildung 4: VR-Headset Vive Pro mit montierten Kopfhörern

Präsentation

Nach den Vorgaben des Auftraggebers sollten mindestens drei Besucher gleichzeitig das VR-Erlebnis nutzen können, und als mobile Installation sollte es zu verschiedenen Veranstaltungen und Festivals leicht transportiert werden können. Um dies zu ermöglichen, wurden in einem Überseecontainer drei Kirchensitzbänke installiert, auf denen die Besucher Platz nehmen können und das VR-Headset aufgesetzt bekommen. Die Holzbänke wurden hierfür im gleichen Abstand wie in der virtuellen Kirche installiert. Hierdurch kommt zur visuellen und akustischen eine haptische Komponente hinzu, die das immersive Erlebnis verstärkt.



Abbildung 5: Überseecontainer mit den VR-Stationen der Himmelsburg-Installation

Die Innenwände des Containers wurden mit Grafiken passend zur Himmelsburg verkleidet. Außen dient ein hydraulisch fahrbares Sonnenverdeck, welches aus der Containerwand aufklappt als Wetterschutz und Unterstand für Sitzgelegenheiten für die Besucher (Abb. 5). In einem abgetrennten, von außen zugänglichem Raum wurden die drei PCs für das Rendering der VR-Umgebung installiert. Auf diese Weise kann der Container bis auf einen Stromanschluss autark betrieben und mittels LKW-Transport zum jeweiligen Veranstaltungsort transportiert werden.



Abbildung 6: Innenraum der Himmelsburg in der VR-Umgebung (Rendering 2022, Prof. Rolf Kruse mit Florian Scharfe, FH Erfurt)

Sobald die Nutzer das VR-Headset im Container aufgesetzt haben, bietet sich ihnen zunächst eine digitale Kopie des Innenraums des Containers. Auf

einer Präsentationsfläche werden Hinweise und eine kleine inhaltliche Einführung gezeigt. Sobald das eigentliche Programm startet, löst sich der virtuelle Container auf und es wird deutlich, dass dieser sich imaginär im Kirchenraum befunden hat. Man sitzt nun in einer der hinteren Reihen der Himmelsburg. An diesem Punkt beginnt das Orchester, die Kantate zu spielen. Der Nutzer kann während des Konzerts über die Controller zwischen den sechs Hörpositionen wechseln. Dabei wandert er vom Kirchenschiff über zwei Emporen bis hinauf zur Orgel und zum virtuellen musikalischen Ensemble. Nach der Sonata folgt der Chor der Kantate, mit welchem die Präsentation endet.

Rezeption

Die virtuelle Himmelsburg wird seit April 2022 Besuchern in Weimar vorgeführt. Die bisherigen, positiven bis enthusiastischen Rückmeldungen der Besucher und der Medien greifen den hohen Grad an Immersion auf, den die Installation bietet. Aus Sicht der Entwickler hat neben der Qualität der visuellen und auditiven Inhalte vor allem auch die räumliche Inszenierung der Medieninstallation einen wesentlichen Beitrag geleistet, den Besuchern ein überzeugendes Erlebnis des virtuellen Raums und des virtuellen Ereignisses zu ermöglichen. Indem die Besucher zu Beginn in einer Kirchenbank Platz nehmen, in der 3D-Umgebung zunächst eine Kopie des Containers erleben, die sich erst in einem zweiten Schritt auflöst und den Blick auf die Himmelsburg freigibt, findet ein allmählicher und Übergang von der physischen in die virtuelle Realität statt. Auf den Hörerplätzen unmittelbar an der Brüstung der ersten, zweiten und dritten Empore bietet die Kirchenbank einen physischen Halt, der beim Blick in die Tiefe der Kirche fast unverzichtbar ist.

Dieser schrittweise, zeitlich nicht zu abrupte und inhaltlich nachvollziehbare Übergang scheint nach den initialen Erfahrungen mit der Installation auch die generelle Bereitschaft des Publikums zu begünstigen, sich auf diese digitale, historische Zeitreise überhaupt einzulassen. Erst wenn diese Bereitschaft einmal vorhanden ist, kann die visuell und akustische detailreiche Rekonstruktion des musikalischen Ereignisses ihre Wirkung entfalten.

Danksagung

Die Autoren möchten sich für die außerordentlich gute Zusammenarbeit aller Projektpartner bedanken, insbesondere bei Christoph Drescher (Thüringer Bachwochen, Thüringer Tourismus GmbH), bei Jörg Arnold für die Zuarbeit seiner Forschungsdaten, bei Tobias Kirchner für seine Beratung zur Klangsynthese der Orgel und die Bereitstellung der zugehörigen Software, beim Ensemble Cantus Thuringia & Capella unter Leitung von Bernhard Klapproth, bei Erik Brauer für die Aufnahmeleitung und Nachbearbeitung, bei David Ackermann für wiederholt großartiges Teamwork bei den Aufnahmen, bei

Thomas Resch für die gemeinsame Weiterentwicklung seines Plugins, bei Prof. Rolf Kruse für die enge Zusammenarbeit bei der Integration der Audio-Engine in das Unity-Projekt sowie bei Jens Nehrbaß für die Umsetzung der Hardware im Container.

Literatur

- Arnold, J. 2005. Raumakustische Rekonstruktion der Schlosskapelle des Weimarer Residenzschlosses im Zustand von 1658-1774. Diplomarbeit. Fakultät Bauingenieurwesen. Bauhaus-Universität Weimar.
- Böhm, C., Ackermann, D., Weinzierl, S. 2021. A Multi-channel Anechoic Orchestra Recording of Beethoven's Symphony No. 8 op. 93. *J. Audio Eng. Soc.*, 68(12), 977-984. <https://dx.doi.org/10.17743/jaes.2020.0056>
- Böhm, C., Schärer Kalkandjiev, Z., Weinzierl, S. 2016. Virtuelle Konzerträume als Versuchsumgebung für Musiker. Fortschritte der Akustik: Tagungsband der 42. DAGA, Aachen. <https://dx.doi.org/10.14279/depositonce-8809>
- Brinkmann, F., Lindau, A., Weinzierl, S., Par, S. V. D., Müller-Trapet, M., Opdam, R., Vorländer, M. 2017. A High Resolution and Full-Spherical Head-Related Transfer Function Database for Different Head-Above-Torso Orientations. *J. Audio Eng. Soc.*, 65(10), 841-848. <https://doi.org/10.17743/jaes.2017.0033>
- Brinkmann, F., Lindau, A., Weinzierl, S., Geissler, G., van de Par, S., Müller-Trapet, M., Opdam, R., Vorländer, M. 2017a: The FABIAN head-related transfer function data base. <https://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5718>
- Brinkmann, F., Lindau, A., Weinzierl, S. 2017b. On the authenticity of individual dynamic binaural synthesis. *J. Acoust. Soc. Am.* 142(4), 1784–1795. <https://doi.org/10.1121/1.5005606>
- Jung, H. R. 1985. Johann Sebastian Bach in Weimar, 1708 bis 1717, Tradition und Gegenwart (Weimarer Schriften, Heft 16). Druckhaus Weimar. Weimar.
- Letellier, J., Droste, M., Böhm, C., Resch, T. 2020. Combining High-Fidelity Visuals and Spatial Acoustics in Virtual Reality - Auralization of a Virtual String Quartet. Tagungsband der Kultur und Informatik: Extended Reality. Berlin.
- Lindau, A., Weinzierl, S. 2009. On the spatial resolution of virtual acoustic environments for head movements in horizontal, vertical and lateral direction. EAA Symposium on Auralization, 1–6. Helsinki, Finland. <https://doi.org/10.14279/depositonce-8668>
- Lindau, A., Weinzierl, S. 2012. Assessing the Plausibility of Virtual Acoustic Environments. *Acta Acustica united with Acustica*, 98(5), 804-810. <http://dx.doi.org/10.3813/AAA.918562>
- Presseportal 2022. Letzter Abruf 29.05.2022. <https://www.presseportal.de/pm/133115/5192256>
- Resch, T., Böhm, C., Weinzierl, S. 2019. A cross platform C-library for efficient dynamic binaural synthesis on mobile devices. Proceedings from AES International Conference on Headphone Technology. San Francisco, USA.
- Schröder, D., Vorländer, M. 2011. RAVEN: A Real-Time Framework for the Auralization of Interactive Virtual Environments. Proceedings from Forum Acusticum 2011. Aalborg, Denmark.
- Shabtai, N. R., Behler, G., Vorländer, M., Weinzierl, S. 2017. Generation and analysis of an acoustic radiation pattern database for forty-one musical instruments. *J Acoust Soc Am*, 141(2), 1246-1256. <https://doi.org/10.1121/1.4976071>
- Weinzierl, S., Vorländer, M., Behler, G., Brinkmann, F., Coler, H. v., Detzner, E., Krämer, J., Lindau, A., Pollow, M., Schulz, F., Shabtai, N. R. 2017. A Database of Anechoic Microphone Array Measurements of Musical Instruments. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-5861.2>