

**Erstellung eines virtuellen  
Referenzraumes für das „Immersive Audio  
Lab“ der HAW Hamburg**

**Bachelor-Thesis**

**Zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.**

**Luisa Dinglinger**



Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Design, Medien und Information

Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Thomas Görne

Zweitprüfer: Prof. Roland Greule

Hamburg, 18.03.2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 3D-Modellierung von Objekten .....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Modellierung in einer 3D-Software .....	8
2.1.2 Photogrammetrie .....	11
2.1.3 3D-Laserscanner .....	14
<b>2.2 Immersiver Sound .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Headrelated Transfer Function (HRTF) .....	16
2.2.2 3D-Audio-Anlage im „Immersive Audio Lab“ .....	17
<b>3. Methodik.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Vorstellung des zu digitalisierenden Raumes .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Auswahl des Verfahrens zur Digitalisierung des Raumes.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Beauftragung einer Firma mit der 3D-Modellierung .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Erstellung des 3D-Modells .....</b>	<b>21</b>
3.4.1 Visuelle Aufnahme des „Immersive Audio Labs“ .....	21
3.4.2 Verarbeitung der aufgenommenen Daten .....	23
<b>3.5 Übergabe des 3D-Modells .....</b>	<b>26</b>
<b>4. Bearbeitung in Unity .....</b>	<b>27</b>
4.1 Virtualisierung der 3D-Audio-Anlage in Unity .....	27
4.2 SOFAlizer .....	33
4.3 Lichtstimmungen .....	36
4.4 User Interface .....	38
<b>5. Ergebnis .....</b>	<b>43</b>
<b>6. Ausblick.....</b>	<b>45</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>46</b>

**Anlage:** - USB Stick mit dem 3D-Modell in Unity und der auditiven Programmierung  
    Name des Ordners: Unity Immersive Audio Lab  
- CD-ROM enthält Abschlussarbeit in PDF-Form

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> Standard Primitives in Blender .....	<b>10</b>
<a href="https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/meshes/primitives.html">https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/meshes/primitives.html</a>	
<b>Abbildung 2</b> Funktionsweise Photogrammetrie .....	<b>12</b>
<a href="https://thehaskinsociety.wildapricot.org/photogrammetry">https://thehaskinsociety.wildapricot.org/photogrammetry</a>	
<b>Abbildung 3</b> Funktionsweise eines Laserscanners .....	<b>15</b>
<a href="http://www.citytunnelleipzig.info/vermessung/3d-laser-scanner-messung.php">http://www.citytunnelleipzig.info/vermessung/3d-laser-scanner-messung.php</a>	
<b>Abbildung 4</b> Laserscanner im Tonlabor.....	<b>22</b>
<b>Abbildung 5</b> Scaneinstellungen .....	<b>22</b>
<b>Abbildung 6</b> Fotokamera .....	<b>23</b>
<b>Abbildung 7</b> Fotoaufnahmen von oben mit Hilfe einer Drohne.....	<b>23</b>
<b>Abbildung 8</b> Screenshot Punktwolke in Reality Capture .....	<b>24</b>
<b>Abbildung 9</b> Screenshot des Arbeitsmodells in Maya .....	<b>25</b>
<b>Abbildung 10</b> Workflow der Datenverarbeitung .....	<b>25</b>
<b>Abbildung 11</b> Einzelne Audio Quelle in Unity .....	<b>29</b>
<b>Abbildung 12</b> Einstellungen Resonance Audio Source in Unity .....	<b>29</b>
<b>Abbildung 13</b> Kugel mit angehefteter Audio Source.....	<b>30</b>
<b>Abbildung 14</b> Script für die Rotation der Kugel.....	<b>31</b>
<b>Abbildung 15</b> Geschwindigkeitseinstellung für die Rotation.....	<b>31</b>
<b>Abbildung 16</b> Einstellungen der Kugel mit dem SOFAlizer Script "SpacializerUserParams" .....	<b>32</b>
<b>Abbildung 17</b> Änderung der HRTF Datensätze .....	<b>34</b>
<b>Abbildung 18</b> Audio Einstellungen in Unity.....	<b>34</b>
<b>Abbildung 19</b> Deckenbeleuchtung in Unity.....	<b>36</b>
<b>Abbildung 20</b> Verknüpfung von digitalem Licht mit dem Modell der Leuchte .....	<b>37</b>
<b>Abbildung 21</b> Einstellungen der Parameter einer Leuchte in Unity .....	<b>37</b>
<b>Abbildung 22</b> Hauptmenu mit der Auswahlmöglichkeit zwischen zwei Audio Setups .....	<b>38</b>
<b>Abbildung 23</b> Audiomenu mit der Auswahlmöglichkeit zwischen zwei Lichtstimmungen.....	<b>39</b>
<b>Abbildung 24</b> On Click Events des Audio Setup 1 Buttons .....	<b>40</b>

<b>Abbildung 25</b> Script für das Laden einer Szene .....	<b>40</b>
<b>Abbildung 26</b> On Click Event für das Laden einer Szene.....	<b>41</b>
<b>Abbildung 27</b> Built Settings in Unity.....	<b>41</b>
<b>Abbildung 28</b> Script für das Abbrechen einer Anwendung .....	<b>42</b>
<b>Abbildung 29</b> On Click Event für das Quit Script .....	<b>42</b>

## **Abstract**

The virtual recreation of existing rooms is increasingly gaining in importance. Especially the conjunction of auditory and visual aspects is leading to an amplified sense of reality and an enlarged application range for „virtual reality“.

In this bachelor thesis the „Immersive Audio Lab“ of HAW Hamburg, which is special in terms of auditory and visual features, was digitalised for the comparison of virtuality and reality.

The room was captured with a 3D laser scanner to be able to model it as realistic as possible. The 3D Audio System was virtually attached to the model in the software Unity.

## **Zusammenfassung**

Die virtuelle Nachbildung von realen Räumen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die Verknüpfung von auditiven und visuellen Aspekten führt zu einem vergrößerten Wirklichkeitsempfinden und zu einem erweiterten Einsatzspektrum von Virtual Reality.

Für einen Vergleich zwischen Virtualität und Realität wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein unter visuellen und auditiven Eigenschaften außergewöhnlicher Raum, das „Immersive Audio Lab“ der HAW Hamburg, digitalisiert.

Zur möglichst realitätsnahen Modellierung des Raumes wurde der Raum mit einem 3D-Laserscanner erfasst und die 3D Audio Anlage mit dem Programm Unity virtuell an das Modell gekoppelt.

# 1. Einleitung

Wie genau lässt sich ein realer Raum in Virtual Reality darstellen und was beeinflusst oder verbessert die wirklichkeitsnahe Darstellung?

Um diese Frage beantworten zu können wurde im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit ein virtueller Referenzraum erstellt. Um eine möglichst hohe Übereinstimmung des virtuellen Raumes mit der Realität zu erzielen wurden hierbei nicht nur visuelle, sondern auch auditive Aspekte berücksichtigt. Mit dem vorliegenden virtuellen Referenzraum besteht nun die Möglichkeit Virtual Reality sowohl visuell, als auch auditiv mit der Realität vergleichen zu können. Virtual Reality wird aktuell noch hauptsächlich für Video Spiele verwendet. Hierbei wird meistens nicht vorausgesetzt, dass der dargestellte Raum oder Bereich besonders wirklichkeitsgetreu dargestellt wird, denn für die Erstellung einer Fantasiewelt ist das Gegenteil sogar manchmal wünschenswert. Zukünftig ist zu erwarten, dass Virtual Reality verstärkt auch in anderen Bereichen eingesetzt wird, bei denen es wichtig ist, dass es besonders genau und wirklich erscheint. So kann man zum Beispiel Räume und auch ganze Häuser digitalisieren und somit vielen Menschen von überall her Zugriff auf diese erlauben. Insbesondere die Verknüpfung eines virtuellen Raumes mit seinen auditiven Besonderheiten wird hierbei das „reale“ Erleben des Raums deutlich steigern können und den Benutzern ein sehr viel realeres Bild zeichnen.

Das Rekonstruieren eines realen Raumes in Virtual Reality ist ein sehr neues und aktuelles Thema mit viel Potential. Daher ist die Technik natürlich noch nicht komplett ausgereift oder für alle zugänglich. Allerdings wird dieses Thema mit der steigenden Beliebtheit von Virtual Reality immer relevanter.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit bestand für mich die Möglichkeit mich intensiv mit diesem Thema beschäftigen zu können. Der besondere Schwerpunkt bei der Auseinandersetzung mit dem Thema liegt in der Berücksichtigung und Verknüpfung von visuellen und auditiven Besonderheiten bei der Modellierung eines Referenzraumes. Mit dem großen Aufnahmerraum im Tonlabor der HAW Hamburg, dem sogenannten „Immersive Audio Lab“, steht ein Raum mit außergewöhnlicher Struktur und auch mit festinstallierter 3D-Audio-Anlage zur Verfügung. Diese Audio-Anlage wurde extra für den großen Aufnahmerraum konzipiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, durch 3D-Modellierung und die entsprechende Programmierung einen virtuellen Raum zu erschaffen, der nicht nur visuell, sondern auch auditiv möglichst real erscheint.

Insbesondere die visuelle Aufnahme und Darstellung des „Immersive Audio Labs“ erfordert eine hohe Professionalität und kostenintensives Equipment. Um eine möglichst realistische Darstellung des „Immersive Audio Labs“ zu erhalten wurde für die 3D-Modellierung eine Firma beauftragt, die sich auf das Virtualisieren von Räumen, Gebäuden und Filmsets spezialisiert hat. Die Finanzierung dieser Arbeiten wurde dankenswerterweise durch das Tonlabor der HAW Hamburg übernommen, da das fertige Modell auch in Zukunft für studentische Projekte verwendet werden soll.

Auf Grund dieser Tatsache beschränkt sich der praktische Teil dieser Arbeit hauptsächlich auf die Digitalisierung der 3D-Audio-Anlage und der Koppelung dieser an das visuelle Modell des Raumes.

Der praktische Teil dieser Bachelorarbeit bzw. die Digitalisierung des „Immersive Audio Labs“ liegt als Unity-Datei vor (siehe Anlage USB Stick).

## 2. Grundlagen

Für die Digitalisierung des „Immersive Audio Labs“ sind einige theoretische Grundlagen wichtig. In diesem Kapitel wird besonders auf die 3D-Modellierungsmöglichkeiten (Kap. 2.1) und die Theorie des 3D-Sounds (Kap. 2.2) eingegangen.

### 2.1 3D-Modellierung von Objekten

Um ein reales Objekt virtuell darstellen zu können, werden heutzutage hauptsächlich die folgenden drei Verfahren angewandt:

1. Modellierung in einer 3D-Software
2. Photogrammetrie
3. 3D-Laserscanning.

In den folgenden Abschnitten werden die drei Methoden erklärt und sowohl die Vor- als auch Nachteile der jeweiligen Methode erläutert.

#### 2.1.1 Modellierung in einer 3D-Software

Bei der Modellierung in einer 3D-Software werden vom Programm vorgegebene geometrische Formen verwendet. Bereits in den 1960er Jahre wurden die ersten 3D Modelle entworfen. Damals war die 3D-Modellierung noch mit sehr hohem Aufwand verbunden. Nur diejenigen, die sich mit Computern auskannten, konnten durch die Verwendung von mathematischen Modellen und Datenanalyse, 3D-Modelle erstellen.<sup>1</sup>

Heutzutage gibt es viele Programme. In der professionellen Szene werden allerdings hauptsächlich Maya oder AutoCAD benutzt. Heimnutzer greifen meistens auf die kostenlose Alternative Blender zurück.

Um ein Objekt durch Modellierung in einer Software zu digitalisieren, muss man dieses zuerst ausmessen. Je genauer das Ergebnis sein soll, desto exakter müssen

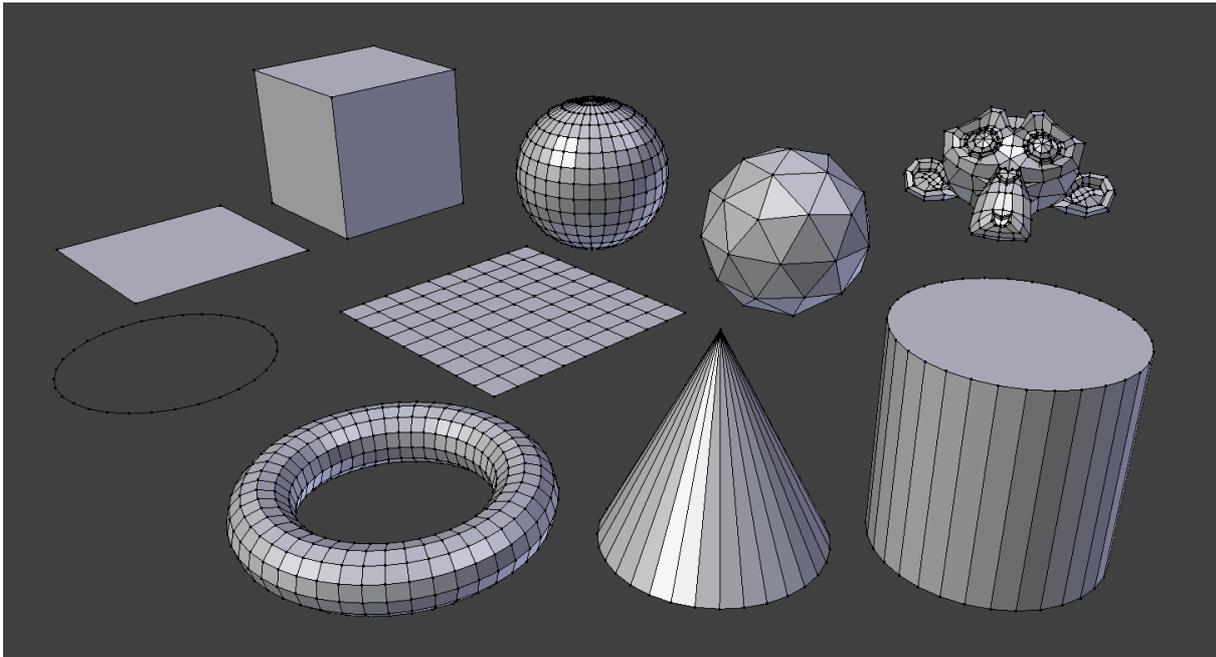
---

<sup>1</sup> <https://archicgi.com/3d-modeling-things-youve-got-know/>

auch die Messdaten sein. Dann kann man das Objekt maßstabsgetreu modellieren. Dabei kann man meistens aus klassischen geometrischen Formen wie Würfel, Kugel, Zylinder, etc. (Abb. 1) auswählen und die Seitenlängen oder den Radius so verändern, dass es dem originalen Objekt entspricht. Dies ist eine sehr einfache Methode, solange man einfache Objekte digitalisieren will. Um komplexere Gegenstände zu virtualisieren, muss man die verschiedenen vorgegebenen Formen so verbinden, dass die gewünschten zu modellierenden Formen daraus resultieren. Außerdem gibt es die Möglichkeit Ecken und Kanten abzurunden. Auf diese Weise kann man jedes beliebige Objekt erstellen, allerdings kann es sehr aufwändig und schwierig werden, ganz exakt zu arbeiten.

Der nächste Schritt um das Modell möglichst real erscheinen zu lassen, ist das sogenannte „Texture Mapping“ um auch die unterschiedlichen Oberflächen darstellen zu können. Die am meisten angewandte Methode ist ein zweidimensionales Bild auf einer Oberfläche abzubilden, sodass z.B. ein Muster zu erkennen ist. Allerdings können feine Strukturen wie z.B. Rillen nicht dreidimensional dargestellt werden, wodurch das Objekt weniger wirklichkeitsgetreu erscheint. Zwar gibt es auch die Möglichkeit dreidimensionale Bilder auf Oberflächen abzubilden, allerdings stellt sich die Frage, ob sich der Aufwand lohnt. Für gängige Strukturen und Muster gibt es Datenbanken.

Das Modellieren durch eine Software macht am meisten Sinn, wenn man ganz klare und einfache Strukturen hat oder wenn das Ergebnis eher grob und nicht detailreich sein sollte.



**Abbildung 1** Standard Primitives in Blender

Vorteile der 3D-Modellierung:

- liefert ein neutrales Modell ohne verfälschende Lichteinwirkung
- alle erdenklichen Formen sind modellierbar
- Objekte können maßstabsgetreu virtualisiert werden
- kostengünstige Umsetzung der Modellierung, keine spezielle Hardware notwendig

Nachteile der 3D-Modellierung:

- die Modellierung ist für komplexe Objekte sehr aufwändig
- exakte Raummodellierung fast unmöglich, auf Grund von hohem Vermessungs- und Modellierungsaufwand
- Verlust kleiner Details
- Oberflächen/ Texturen müssen manuell hinzugefügt werden (schwierig es real aussehen zu lassen)

## 2.1.2 Photogrammetrie

Der Ursprung des photogrammetrischen Verfahrens lässt sich bereits bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. Die Theorie dazu wurde gemeinsam mit dem Beginn der Fotografie sowohl in Frankreich als auch in Deutschland entwickelt. Die Photogrammetrie entstand ursprünglich aus dem Bauwesen bzw. der Architektur, da sie als Mittel zur Vermessung von Gebäuden durch Fotografien benutzt werden sollte.

Besonders die Erfindung des Flugzeuges stellte eine enorme Erleichterung für die Architekten und Landschaftsbauer dar, da von nun an auch Fotos aus der Luft aufgenommen werden konnten. Auf Grund der Entwicklung von Computern konnten mit der Zeit die analogen Auswertverfahren durch digitale ersetzt werden und somit präzisiert werden. Heutzutage wird die Photogrammetrie nicht nur noch ausschließlich zur Vermessung, sondern auch zur Erstellung von virtuellen 3D-Modellen verwendet.<sup>2</sup>

Bei diesem Verfahren werden möglichst viele hochauflösende Fotos von einem Objekt gemacht, sodass die gesamte Oberfläche erfasst wird. Dabei ist es wichtig, dass die Fotos sich überlappen und alle Oberflächen und Bestandteile des Objektes aus möglichst vielen Blickwinkeln fotografiert werden. Es ist darauf zu achten, dass die Einstellungen der Kamera für jedes Foto gleich sind und am besten bei natürlichem Licht gearbeitet wird.

Danach werden die Fotos in einem speziellen Programm ausgewertet. Das Programm berechnet in welchem räumlichen Verhältnis sich die Objekte auf den Bildern zueinander befanden, als das Foto geschossen wurde. Dies geschieht indem der Computer alle Fotos untereinander auf Gemeinsamkeiten prüft und dadurch erkennen kann, von wo das Foto aufgenommen wurde<sup>3</sup> (Abb.2). Aus diesen Informationen wird zunächst eine Punktwolke generiert, die den Umriss des Objektes darstellt. Die Dichte der Punkte und somit auch die Genauigkeit des Modells hängen hierbei von der Anzahl und der Qualität der Fotos ab.

---

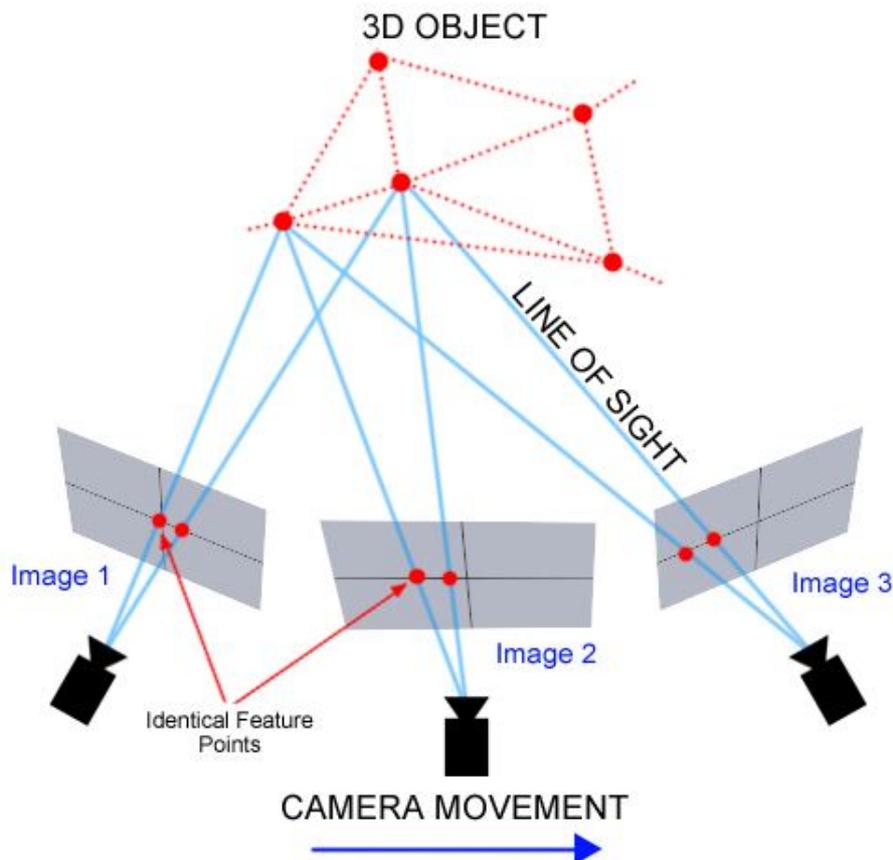
<sup>2</sup> Vgl. Kraus, Karl, S. 3-4

<sup>3</sup> <https://www.linearis3d.de/wie-funktioniert-photogrammetrie-FAQ.html>

Da man nun immer noch kein vollständiges 3D-Modell mit Oberflächen hat, wird die Punktwolke in einem anderen Programm weiterverarbeitet. Bei diesem Schritt zeigt sich dann endgültig wie brauchbar die verwendeten Fotos wirklich waren. Die einzelnen Punkte werden interpoliert und man bekommt ein fertiges Modell. Dieses enthält jedoch möglicherweise immer noch Artefakte oder Löcher, die man manuell durch 3D-Modellierung in einer Software beheben muss.

Solche Artefakte kommen dadurch zustande, dass das Programm nur Objekte (bzw. Punkte) relativ zueinander auswerten kann. Hat man jetzt eine Oberfläche, die komplett gleichbleibend ist oder großflächig Licht reflektiert (und somit nur eine weiße Oberfläche darstellt), dann kann kein Unterschied erkannt werden und das Programm hat Probleme das Objekt genau zu modellieren.

Je mehr Fotos man bei der Photogrammetrie benutzt und je hochauflösender diese sind, desto größer ist auch die Datenmenge, die ausgewertet werden muss. Deshalb kann es sein, dass man bereits für ein einzelnes Objekt mehrere Stunden braucht bis es komplett virtualisiert ist.



**Abbildung 2** Funktionsweise Photogrammetrie

### Vorteile der Photogrammetrie:

- relativ einfache Anwendung
- an spezieller Hardware ist nur eine Kamera notwendig
- Aufnahme der Fotografien nicht sehr zeitaufwändig
- für kleine Objekte hochauflösende Ergebnisse

### Nachteile der Photogrammetrie:

- spezielle Software notwendig (teilweise kostenintensiv)
- große Anzahl von Fotos und damit eine große Datenmenge notwendig zur Erzielung guter Ergebnisse -> Zeitaufwand für Rendering
- zwar hochauflösend, aber nicht sehr genau
- schwierig bei glatten Oberflächen (wenig Struktur)
- keine neutrale Lichteinwirkung
- natürliches bzw. gleichmäßiges Licht ist notwendig

### 2.1.3 3D-Laserscanner

Der 3D-Laserscanner kommt, genau wie die Photogrammetrie, aus der Vermessung bzw. Architektur. Aber auch in der Archäologie oder Kriminaltechnik wird diese Methode gerne zur Bestandsaufnahme verwendet. Bereits in den 1960er Jahre wurden die ersten Laserscanning-Technologien entwickelt. Allerdings dauerte es noch ca. 30 Jahre bis wirklich praktische und verwendbare Systeme hergestellt wurden. Dafür war natürlich die immense Verbesserung von Computerleistung und Speicherplatz notwendig. Auch heute noch sind die Daten aus einem 3D-Laserscan so groß, dass man diese als Heimanwender kaum weiterverarbeiten kann.<sup>4</sup>

Der große Vorteil eines Laserscanners ist, dass durch die enorme Daten- und Punktmenge, die man erhält, ein Raum sehr genau aufgenommen und rekonstruiert werden kann.

Der Scanner schickt Lichtimpulse in den Raum. Diese werden von den in dem Raum vorhandenen Objekten und Oberflächen reflektiert und zu dem Scanner zurückgeschickt. Aus den Ergebnissen bzw. den Laufzeitdifferenzen, kann der Scanner dann die Lage der Objekte und Oberflächen bestimmen.<sup>5</sup>

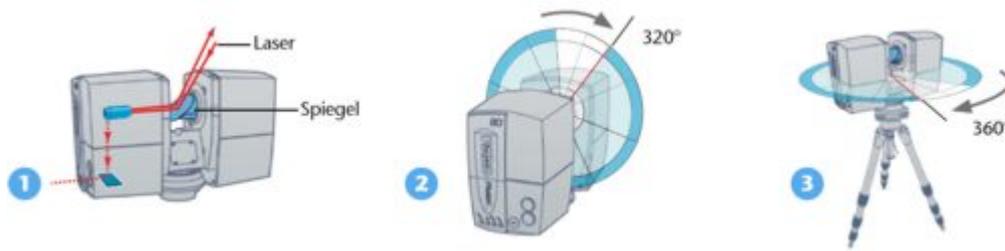
Die Lichtimpulse werden in 320° vertikal abgesendet, danach dreht sich der Scannerkopf horizontal und sendet wieder vertikal. (Abb.3) Dadurch wird der gesamte Raum abgedeckt. Je nach Qualität bzw. der Auflösung des 3D-Laserscanners passiert dies genauer oder ungenauer. Die Ablenkung des Laserstrahls geschieht meistens durch einen Umlenkspiegel.

Auch bei dieser Methode wird später aus den aufgenommenen Daten eine Punktwolke generiert, die weiterverarbeitet werden muss. Jedoch ist diese Datei auf Grund der hohen Präzision des Scanners sehr groß. Viele Programme haben Probleme die entstandenen Punktwolken weiterzuverarbeiten.

---

<sup>4</sup> <http://floridalaserscanning.com/3d-laser-scanning/history-of-laser-scanning/>

<sup>5</sup> <https://www.laserscanning-europe.com/de/glossar/funktionsweise-eines-laserscanners>



**Abbildung 3** Funktionsweise eines Laserscanners

Vorteile des 3D-Laserscanners:

- sehr genaues Verfahren, auch relativ feine Strukturen werden erfasst
- alle Punkte des Raumes sind erfassbar
- Scanning auch ohne äußere Lichteinwirkung auf Objekte möglich

Nachteile des 3D-Laserscanners:

- spezielle Hardware (Laserscanner) + Software (Verarbeitung der Daten) notwendig -> kostenintensiv
- nicht einfach zu bedienen, Erfahrung notwendig für die Bestimmung der optimalen Positionierung des Scanners

Um ein möglichst präzises und detailreiches Ergebnis des auszumessenden Objektes zu bekommen, liefert der 3D-Laserscanner von den drei beschriebenen Methoden die besten Ergebnisse. Allerdings ist die Grundvoraussetzung für ein wirklich gutes Resultat eine entsprechende Erfahrung bei der Handhabung und Bedienung des Gerätes. Erfahrene Nutzer sollten genau wissen, wie viele Scans nötig sind und von welchen Standpunkten aus diese durchgeführt werden müssen. Wenn dies der Fall ist, dann hat man bei der eigentlichen Aufnahme des Objektes den kleinsten Aufwand, da der Scanner automatisch einen 360° Scan durchführt, sobald man den Startknopf gedrückt hat.

Jedoch ist für die Nachbereitung des Scans ein vergleichbar großer Aufwand wie bei der Photogrammetrie notwendig. Für die Anschaffung oder das Ausleihen eines 3D-Scanners bzw. der Hardware und der zugehörigen Software sind deutlich höhere Kosten als bei einem einfachen Fotoapparat einzukalkulieren.

## 2.2 Immersiver Sound

Eine Besonderheit des „Immersive Audio Labs“ im großen Tonstudio der HAW ist die festinstallierte 3D-Audio-Anlage. Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die Funktionsweise eingegangen.

Das Wort immersiv kommt von dem englischen Wort „immersive“ und bedeutet so viel wie umfassend. Bei immersiven Sound oder auch 3D-Sound, kann der Zuhörer Geräusche nicht mehr nur aus zwei, sondern aus drei Richtungen hören. Der Sound kommt also von links/rechts, vorne/hinten und oben/unten. Der Zuhörer ist umgeben von Sound, der auf diese Weise viel natürlicher wirkt.

### 2.2.1 Headrelated Transfer Function (HRTF)

Bei dem Erlebnis von 3D-Sound spielt die Headrelated Transfer Function *HRTF* (deutsch: kopfbezogene Übertragungsfunktion) eine wichtige Rolle. Da jeder Mensch eine individuelle Ohrmuschel hat, wird bei jedem der ankommende Schall anders reflektiert und klingt bei jedem Menschen unterschiedlich. Auch die Reflektionen durch den Kopf und Körper spielen eine Rolle. Aus diesem Wissen wird die HRTF generiert.<sup>6</sup>

Die individuelle HRTF eines Menschen kann durch ein kleines Mikrofon gemessen werden, das am Eingang des Gehörgangs positioniert wird. Mit den dadurch gemessenen Daten kann man das Hörerlebnis mit Kopfhörern realistischer machen und auf den Hörer anpassen. Falls die individuellen Daten nicht vorhanden sind, gibt es genug HRTFs von Probanden oder Dummies. Allerdings werden diese, je nachdem wie sehr sich die Merkmale unterscheiden, das Hörerlebnis von 3D-Sound verschlechtern.

---

<sup>6</sup> <http://www.sengpielaudio.com/KopfbezogeneUebertragungsfunktionHRTF.pdf>

### **2.2.2 3D-Audio-Anlage im „Immersive Audio Lab“**

Das 3D-Audio-System im „Immersive Audio Lab“ der HAW Hamburg wurde dort Anfang 2018 installiert. Sie besteht aus Lautsprechern, die in fünf Ebenen kreisförmig an einem Rig angebracht wurden. Jede Ebene enthält entweder vier oder acht Lautsprecher. Am höchsten Punkt über dem Sweet Spot hängt der Voice of God. Die gesamte Installation wurde extra für diesen Raum konzipiert. Das verwendete System ist Dolby Atmos.

Durch die kreisförmige Anordnung der Lautsprecher wird ein Soundfeld generiert. Die Klänge können innerhalb dieses Soundfeldes beliebig im Raum verteilt werden, sodass der Sound nicht mehr nur aus einem bestimmten Lautsprecher, sondern von einer beliebigen Position im Raum kommt. Dadurch wirkt der Sound viel realer als z.B. bei Stereo- oder Surround-Sound.

## **3. Methodik**

### **3.1 Vorstellung des zu digitalisierenden Raumes**

Das „Immersive Audio Lab“ der HAW Hamburg ist der größte Aufnahmerraum des Tonlabors. Da der Raum multifunktional genutzt wird, werden hier nicht nur Bands aufgenommen, sondern auch Projekte durchgeführt oder Konzerte gespielt.

Vor über einem Jahr wurde nun auch eine 3D-Audio-Anlage installiert, um weiterhin auf dem neuesten Stand sein zu können. Außerdem ist in dem Raum bereits eine fest installierte HTC Vive Virtual Reality Brille vorhanden.

Das Immersive Audio Lab hat den Grundriss eines unregelmäßigen Oktagons mit einer Grundfläche von rund 80 m<sup>2</sup>, einem Volumen von ca. 470 m<sup>3</sup> und einer Höhe von ca. 6 m. An fünf Seiten des Oktagons befinden sich Fenster, an zwei sind Absorber angebracht und an der letzten Seite ist der Eingang. Die 3D Audio Anlage besteht aus Lautsprechern, die kreisförmig in verschiedenen Höhen an einem Rig angebracht sind, bzw. kreisförmig auf dem Boden stehen. Insgesamt gibt es fünf Ringe mit jeweils vier oder acht Lautsprechern plus den Voice of God. Das Rig ist mit weißem Molton bedeckt.

Weitere feste, aber verschiebbare Bestandteile des Aufnahmerraumes sind die Workstation mit Stuhl, ein Rack und der Teppich.

## 3.2 Auswahl des Verfahrens zur Digitalisierung des Raumes

Einer der wichtigsten Aspekte dieser Arbeit war die Entscheidung welches Verfahren bei der Digitalisierung des „Immersive Audio Labs“ verwendet werden soll. Dabei wurden die drei bereits in Kapitel 2.1 beschriebenen Möglichkeiten in Betracht gezogen und deren Vor- und Nachteile abgewogen.

Die ursprüngliche Intention dieser Arbeit war die Virtualisierung des Raumes komplett eigenständig durchzuführen. Da aber für alle drei Methoden Spezialwissen bei der Handhabung der Geräte, bzw. große Erfahrung mit den Bearbeitungsprogrammen nötig gewesen wären, konnte das Vorhaben im Rahmen einer Bachelorarbeit und ohne Unterstützung nicht realisiert werden.

Auf Grund der Vorgabe, dass der Raum möglichst exakt virtualisiert werden sollte, war die Verwendung eines 3D-Laserscanners die beste Option. Nach einigen Gesprächen mit Verleihfirmen von Laserscannern und Experten, wurde zur Erzielung eines bestmöglichen Resultats entschieden, die Virtualisierung des „Immersive Audio Labs“ von einer professionellen Firma durchführen zu lassen. Der Vorteil dabei ist, dass diese bereits genau wissen an welcher Stelle im Raum der Scanner aufgebaut werden muss, wie viele Scans nötig sind und welche Einstellungen an dem Scanner vorgenommen werden müssen, um ein optimales Resultat zu erzielen. Außerdem kennen sie sich nicht nur sehr gut mit der Hardware, sondern auch der benötigten Software aus. Der Nachteil ist, dass die Beauftragung einer Firma deutlich kostenintensiver ist, als das Ausleihen der Hardware.

Im Laufe der Arbeiten zur Digitalisierung des Tonstudios, stellte sich heraus, dass ein noch besseres Ergebnis zu erzielen ist, wenn aufbauend auf den Laserscan auch die anderen beiden oben beschriebenen Methoden in dem Modell verarbeitet werden. Zum Beispiel ist die Rekonstruktion von Oberflächen und Materialien einfacher zu verwirklichen, wenn diese vorher fotografiert wurden. Die Fotos können dann in einem Programm so aufbereitet werden, dass sie hinterher in dem 3D-Modell als Textur dienen können. Auch bei der Ausbesserung des durch 3D-Laserscanning entstandenen Modells ist die Verwendung von sowohl Photogrammetrie, als auch 3D-Modellierung in einer Software von Vorteil.

Eine weitere Entscheidung, die gefällt werden musste war, in welchem Programm das Modell weiterverarbeitet werden sollte. Zur Auswahl standen die beiden Game Engines Unity und Unreal. Da sich die beiden Programme sowohl in der visuellen Verarbeitung von 3D-Modellen, als auch bei der Programmierung von Audio kaum unterscheiden, wären beide Möglichkeiten gleich gut gewesen. Da Unity aber etwas geläufiger ist und es das Audio Plugin SOFA Spatializer nur für diesen Engine gibt, fiel die Entscheidung auf Unity.

### **3.3 Beauftragung einer Firma mit der 3D-Modellierung**

Nach der Entscheidung eine professionelle Firma mit der 3D-Modellierung des „Immersive Audio Labs“ zu beauftragen, musste eine passende gefunden werden. Da dieser Arbeitsbereich sehr speziell ist, sind im Hamburger Raum nicht viele Firmen tätig, die mit Laserscannern arbeiten. Die Erstellung von 3D-Modellen von Räumen, die später auch in Virtual Reality weiterverarbeitet werden können wird nur von der Firma Minimysset angeboten. Bereits in der Vergangenheit bestand Kontakt zwischen einem Mitarbeiter der Firma, Herrn Uwe Zahn, und der HAW Hamburg. Aufgrund dieses Kontaktes konnte ein Angebot für einen Laserscan angefragt werden. Nach einem ausführlichen Telefonat und einigen Informationen bezüglich des Projektes und des zu digitalisierenden Raumes wurde ein Angebot ausgestellt. Bestandteil des Angebotes waren neben dem 3D-Laserscanning, auch Fotoaufnahmen und Drohnenaufnahmen, sowie die Nachbearbeitung des Scans. Folgende Leistungen wurden festgelegt:

- Hochwertiges 3D-Laser- und Fotoscanning für die 3D-Modell- und Texturerstellung des Aufnahmeraums zur Aufbereitung in der Unity-Engine.
- Zusätzlich detailliertes 3D-Scanning von Boxen und eines 19 Zoll Racks.
- 3D- Aufbereitung / Remodeling / Texturing / Shading der Scandaten für 3D - VR in der Unity-Engine. Performancegrundlage ist die effektive Lauffähigkeit auf einer vorhandenen, definierten PC-Workstation im Tonlabor.

## **3.4 Erstellung des 3D-Modells**

### **3.4.1 Visuelle Aufnahme des „Immersive Audio Labs“**

Vorbereitend wurden Einzelheiten bezüglich des Raumes und des Projektes geklärt. Dazu wurde eine Woche vor der Ausführung des Scans eine Raumbegehung durchgeführt. Dies war notwendig, um das benötigte Equipment (z.B. Drohne für Fotos von oben) zu bestimmen und den Arbeitsaufwand sowohl für die Aufnahme des Raumes, als auch für die Nachbearbeitung zu berechnen. Außerdem wurde bestimmt, welche Aspekte des Raumes besonders wichtig sind, wie z.B. die 3D-Audio-Anlage.

Durch den zuständigen Ansprechpartner bei der Firma Minimysset, Herrn Uwe Zahn erfolgte auch die Ausführung des Scan in der vorlesungsfreien Zeit. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, da alle Arbeiten in Ruhe und ungestört durchgeführt werden sollten.

Für eine größtmögliche Flexibilität bei der Weiterverwendung des 3D-Modells wurde entschieden, nur die Gegenstände im Raum zu belassen, die später im Modell auf jeden Fall vorhanden sein sollen und nutzungsunabhängig immer im Raum vorhanden bleiben.

Der Scanner wurde zuerst in der Mitte des Raumes platziert (Abb. 4). Zum Einsatz kam ein Scanner der Marke Faro Focus 3D Scanner. Die erforderlichen Einstellungen (z.B. Scanraster, Auflösung usw.) werden vorab an dem Scanner über ein Eingabemenü vorgenommen (Abb. 5). Anschließend wurde der erste Scan durchgeführt. Dabei sollte sich nach Möglichkeit niemand im Raum aufhalten, da dies die Aufnahmen verfälschen könnte. Solange man aber nicht in der Linie der abgesendeten Lichtimpulse steht, wird man allerdings auch nicht aufgenommen.



**Abbildung 4** Laserscanner im Tonlabor



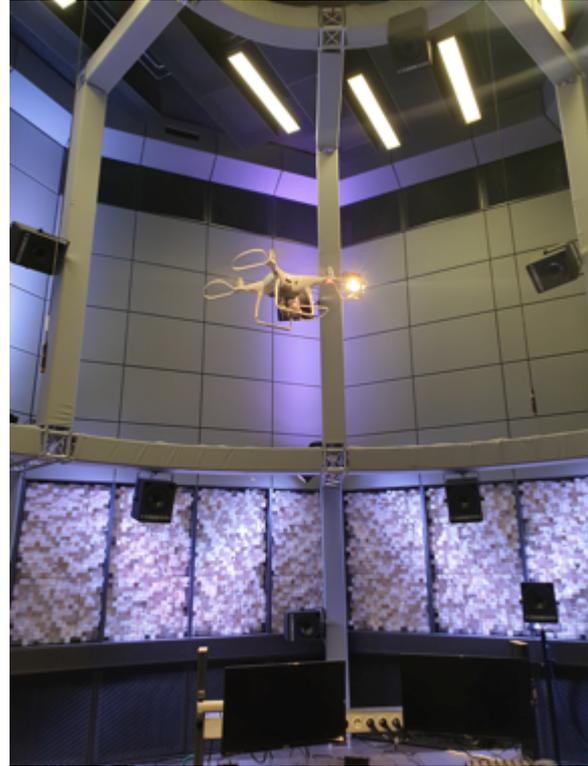
**Abbildung 5** Scaneinstellungen

Der Scanner ist so aufgebaut, dass der Laserstrahl sich bei einer festen Position des Gerätes vertikal dreht und den Raum scannt. Wenn dies geschehen ist, rotiert der Scannerkopf horizontal um 1cm und scannt wieder. Auf diese Weise kann der gesamte Raum erfasst werden. Der gesamte Prozess dauerte bei den gewählten und vorgegebenen Einstellungen ca. 14 Minuten. Um aber den gesamten Raum mit allen Einzelheiten erfassen zu können, sind mehrere Scans (15-20 Stück) von unterschiedlichen Standpunkten des Gerätes aus nötig. Da dies alleine schon 4-5 Stunden dauert, wurden gleichzeitig mit einer Kamera auf einem Stativ Bilder aufgenommen (Abb. 6). Auch diese Kamera wurde rotiert, sodass möglichst der gesamte Raum abgedeckt werden konnte.

Aufgrund der Deckenhöhe des Aufnahmebereiches wurde abschließend noch eine Drohne eingesetzt (Abb. 7). Die Drohne konnte so von oben den Raum erfassen, sodass es zum Schluss wirklich von dem gesamten Raum aus allen Blickwinkeln Material gab.



**Abbildung 6** Fotokamera



**Abbildung 7** Fotoaufnahmen von oben mit Hilfe einer Drohne

### 3.4.2 Verarbeitung der aufgenommenen Daten

Nachdem der gesamte Raum durch Laserscans und Fotos aufgenommen wurde, ist der nächste Schritt die Weiterverarbeitung der vorhandenen Daten in verschiedenen Softwares (Abb. 10). Für die Weiterverarbeitung der Daten kamen folgende Softwares zum Einsatz:

- Scene (Verarbeitung der Messergebnisse)
- Reality Capture (Verknüpfung mit Fotos)
- Z-Brush (Säuberung des Modells)
- Bridge, Camera-RAW (Aufbereitung der Fotos)
- Photoshop, Mari, Substance Painter (Aufbereitung der Texturen und Materialien)
- Maya (Remodellierung/ Retopologisierung des Modells)

Folgende Arbeitsschritte wurden bei der Bearbeitung der Scans durchgeführt:

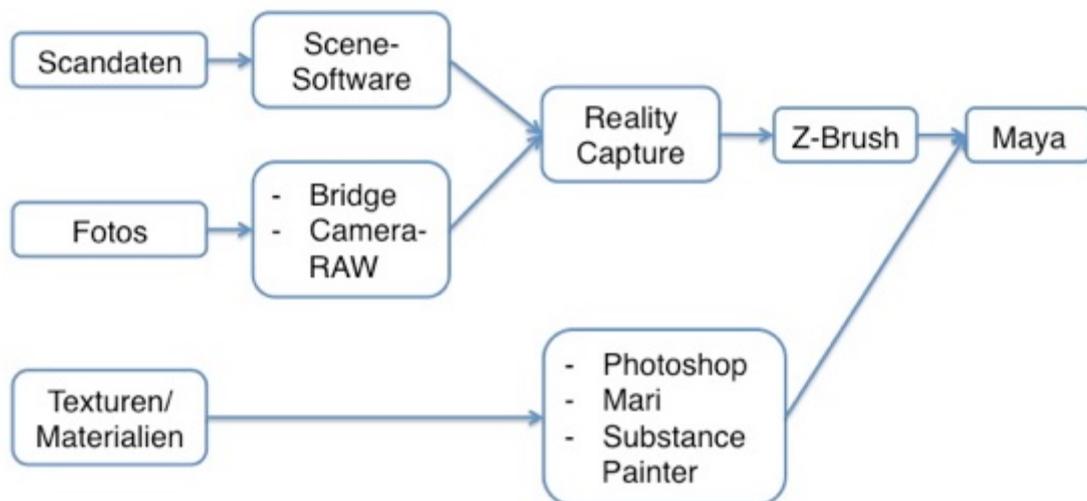
Die aufgenommenen Scandaten mussten zunächst in der zugehörigen Software „SCENE“ der Firma Faro aufrufen werden. Dabei wurden keine Daten gefiltert. Die Software generierte dann aus den Daten eine Punktwolke (Abb. 8). Diese wurde als e57 Datei exportiert und diente als Grundlage für die Weiterverarbeitung in der Photogrammetrie Software „Reality Capture“. In diesem Programm wurden die Fotos hinzugefügt und das 3D-Modell mit durchgängigen Oberflächen (nicht mehr nur Punkte) generiert. Dieses Modell wurde nun in der Software „z-Brush“ überarbeitet, indem Artefakte ausgebessert wurden. Im letzten Schritt wurde das Modell in Maya remodeled bzw. retopologisiert (Abb. 9). Das bedeutet, dass die vorhandenen Objekte nochmal durch manuelle 3D-Modellierung verbessert wurden. Außerdem wurden den Objekten Texturen und Materialien hinzugefügt, die vorher in „Photoshop“, „Mari“ oder „Substance Painter“ aufbereitet wurden (vgl. Kapitel 3.2).



**Abbildung 8** Screenshot Punktwolke in Reality Capture



**Abbildung 9** Screenshot des Arbeitsmodells in Maya



**Abbildung 10** Workflow der Datenverarbeitung

Was diesen Workflow besonders effektiv macht, ist, dass alle drei Methoden zur 3D-Modellierung von Objekten benutzt wurden. Es wurden sowohl 3D-Laserscans aufgenommen, Fotos durch Photogrammetrie bearbeitet als auch manuell in einer Modelling Software gearbeitet.

### 3.5 Übergabe des 3D-Modells

Am 23.01.2019 erfolgte dann die Übergabe des Modells. Dabei fiel auf, dass das Modell in Unity leider nicht so genau und scharf war, wie in anderen 3D-Programmen wie z.B. Maya. Das liegt hauptsächlich daran, dass das Modell durch die hohe Genauigkeit und Präzision eine sehr hohe Datenmenge hat. Für eine weitere Bearbeitung mit dem Programm Unity musste es deutlich runtergerendert werden. Auch obwohl die Datei nun schon deutlich kleiner war, hatte man mit älteren oder weniger leistungsstarken Computern Probleme die Datei aufzurufen.

Weiterhin war das Modell durch die Virtual Reality Brille betrachtet noch nicht maßstabsgetreu. Das stellt natürlich ein grundlegendes Problem dar, da man für den direkten Vergleich zwischen Realität und Virtualität das Modell im gleichen Maßstab wie den Raum braucht. Aus diesem Grunde waren auch die Lautsprecherpositionen nicht so genau wie gewünscht.

Bei einem weiteren Termin mit der Firma Minimysset wurde der Scan über das Modell gelegt und gezeigt, dass diese zu 99% übereinstimmen. Der Fehler liegt also in Unity und nicht in dem Modell an sich.

Alle Daten, die für das Erstellen des gesamten 3D-Modells nötig waren, wurden auf einer Festplatte übergeben (ca. 400 GB). Dazu gehörten die Scan-Daten, Maya-Daten, Photoshop-Daten, Lightroom-Daten und Fotos. Die Unity Datei an sich hatte allerdings nur ca. 4GB.

## **4. Bearbeitung in Unity**

### **4.1 Virtualisierung der 3D-Audio-Anlage in Unity**

#### Zielsetzung

Das Ziel der Digitalisierung der 3D-Audio-Anlage ist einen Vergleich zu haben zwischen der Realität und der Virtualität. Der Sound der virtuellen Audio-Anlage sollte also möglichst dem des realen Klanges gleich sein. Bei einer 3D-Audio-Anlage kann man nicht nur wie bei Surround Sound Systemen von zwei Richtungen (vorne/hinten, links/rechts) Geräusche hören, sondern erstmals auch zwischen oben und unten unterscheiden. Dadurch wird das Raumklangerlebnis deutlich verbessert.

Die Virtualisierung der 3D-Anlage erfolgte in dem Game Engine Unity auf Basis des zuvor erstellten 3D-Modells des „Immersive Audio Labs“.

#### Durchführung

Um dieses Vorhaben durchzuführen wurden zwei unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt, die allerdings beide nicht zu 100% die Wirkungsweise der 3D-Audio-Anlage im „Immersive Audio Lab“ wiedergeben. Um diese zu erzielen, wäre eine komplexe Programmierung von einer digitalen Signalverarbeitung nötig gewesen, die den Audio Dome ansteuert. Bei dem ersten Lösungsansatz wurde zu jedem vorhandenen Lautsprecher eine virtuelle Audio Source zugeordnet, bei dem zweiten Lösungsansatz gibt es nur eine einzige Audioquelle, die sich allerdings im Raum bewegt.

## Lösung 1

Die Grundidee dieses Ansatzes war, dass man jede der in dem 3D-Audio-System vorhandenen Schallquellen individuell hören kann. Die Schallquellen sind statisch und der Audio Listener (also der virtuelle Zuhörer) kann sich beliebig im Raum bewegen und erkennen aus welchem Lautsprecher der Sound kommt. Leider hat man bei dieser Lösung nicht den Effekt einer 3D-Audio-Anlage, dass der Sound für die Wahrnehmung des Zuhörers aus jedem beliebigen Punkt des Raumes kommen kann. Stattdessen kommt er nur aus den vorhandenen Audioquellen. Dafür hat man aber jeden einzelnen Lautsprecher integriert.

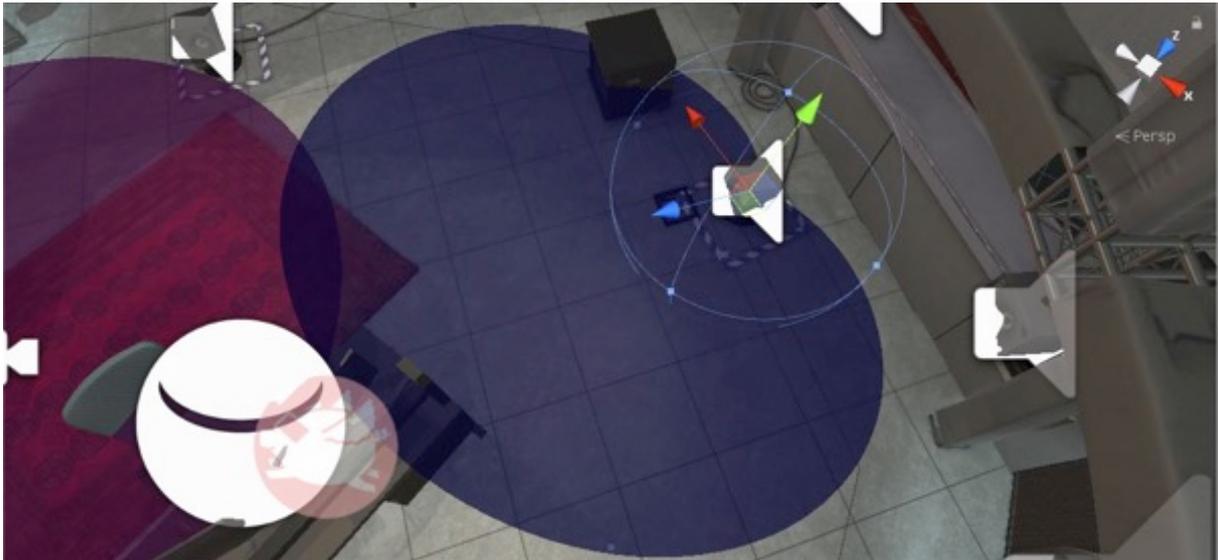
Um das Vorhaben in Unity zu realisieren wurde zuerst jedem der Lautsprecher eine virtuelle Audio Source zugeordnet. Diese wurden so ausgerichtet, dass sie dem Abstrahlwinkel der realen Schallquellen entsprechen und ungefähr in der Mitte der Lautsprecherboxen positioniert sind (Abb. 11).

Nun war das Problem, dass die ganz normalen Audio Sources, die bereits in Unity vorhanden sind, immer gleichbleibende Lautstärken haben. Das bedeutet, dass es für die Lautstärke des ausgegebenen Sounds keinen Unterschied macht, wie weit man von der Quelle entfernt steht. Für dieses Problem gibt es eine Lösung durch das kostenlose Audio Plugin „Resonance Audio SDK“ von Google. Dieses Plugin ermöglicht es einem Objekt noch eine Resonance Audio Source hinzuzufügen. Nun kann man einen Radius einstellen und sobald man sich in diesem befindet und sich der Quelle nähert, verändert sich auch die Lautstärke. Auch können noch weitere Einstellungen bezüglich der Audioquelle gemacht werden (Abb. 12).

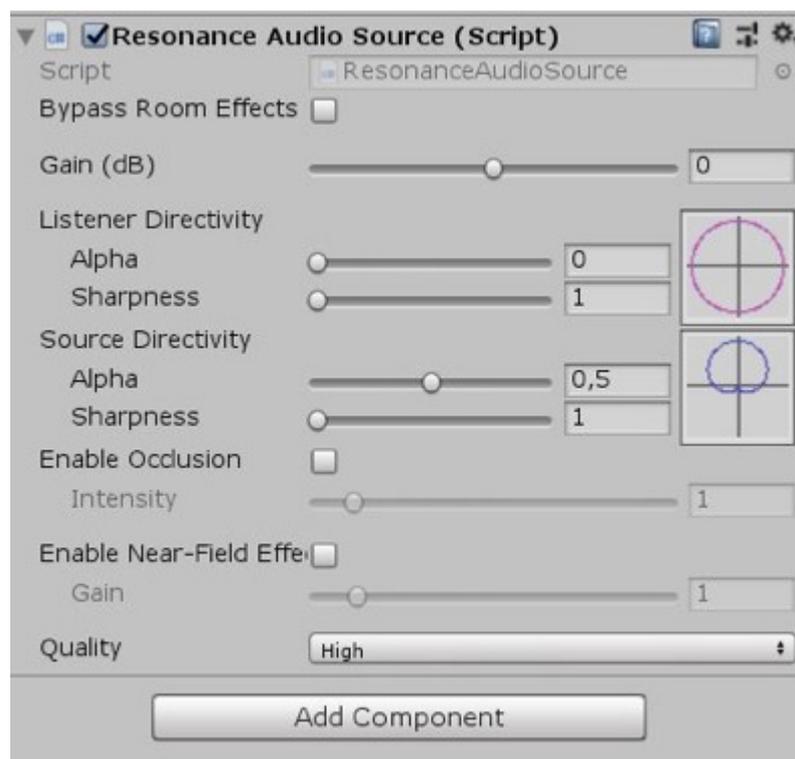
Ein Nachteil dieses Plugins ist, dass nur ein einziger Datensatz von HRTFs benutzt wird. Man kann diesen nicht individuell einstellen.

Eine Lösung dieses Problems stellt das Plugin SOFAlizer dar, auf welches noch weiter in Abschnitt 4.2 eingegangen wird. Da man die beiden Plugins „Resonance Audio SDK“ und „SOFAlizer“ nicht simultan benutzen kann, wurde der „SOFAlizer“ in das zweite Audio Setup eingebaut.

Wenn man sich nun im Raum bewegt und sich den Lautsprechern nähert, kann man ganz genau erkennen aus welcher Richtung der Sound kommt und wie intensiv dieser ist.



**Abbildung 11** Einzelne Audio Quelle in Unity



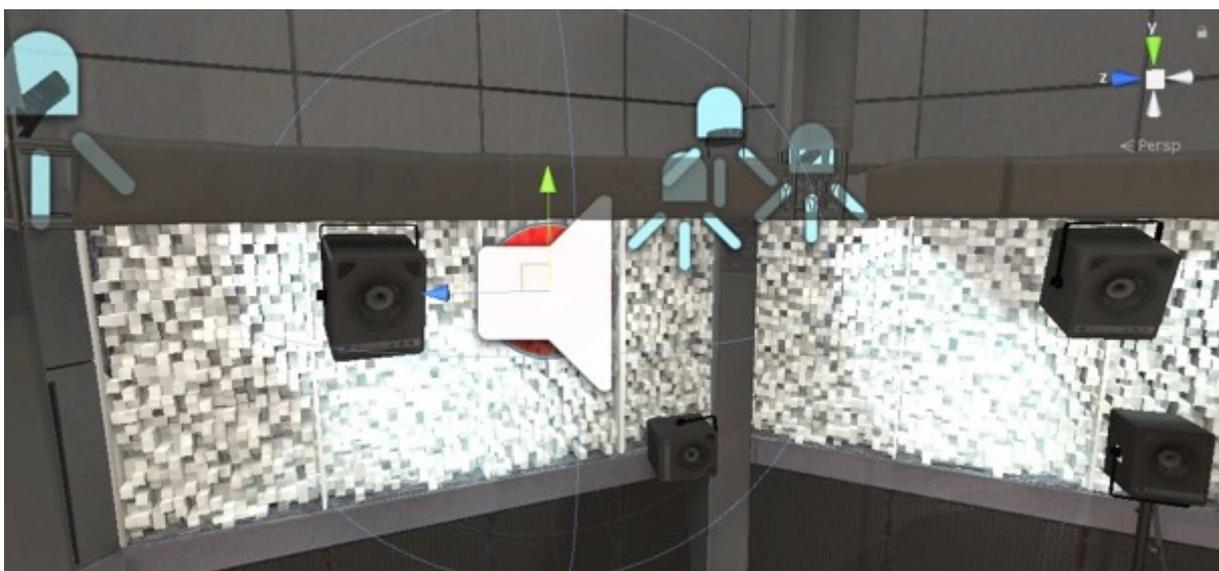
**Abbildung 12** Einstellungen Resonance Audio Source in Unity

Ein Vorteil dieser Lösung ist, dass alle Schallquellen implementiert sind und die Dynamik des Sounds sich verändert, wenn man sich auf eine Quelle zubewegt. Jedoch kann die Eigenschaft des 3D Sounds, dass sich ein Geräusch im Raum bewegt nicht erzeugt werden. Außerdem besteht keine Möglichkeit verschiedene HRTF Datensätze zu verwenden.

## Lösung 2

Diese Lösung geht eher auf die Eigenschaften von 3D Sound ein. Dieses Mal bewegt sich nicht der Zuhörer, sondern die Schallquelle. Die Grundidee ist, dass sich eine einzige Quelle im Radius des Audio Domes um den Sweetspot dreht. So bekommt man den gleichen Effekt, den auch die installierte 3D-Anlage bietet. Der Nachteil ist, dass dieser Effekt nicht wie in der Realität durch die Lautsprecher entsteht und somit nicht direkt vergleichbar ist.

Bei diesem Lösungsansatz wurde einfach eine neue Audio Source erstellt und diese einem neuen Objekt zugeordnet, damit auch visuell sichtbar wird, wo sich die Quelle gerade bewegt und ob es funktioniert (Abb. 13). Danach wurde ein neues Script mit dem Namen „AudioSourceRotator“ erstellt. Das Script wurde wie in Abb. 14 gezeigt programmiert, damit sich die Quelle in x, y und z Richtung um einen Spot bewegt. Danach wurde ein neues Objekt erstellt, welches als Bezugspunkt für die Audio Kugel dient. Diesen Punkt kann man durch das Einstellen der Koordinaten beliebig verschieben. In diesem Fall soll er allerdings auf dem Sweetspot liegen. Die Audio Kugel muss man auf einen beliebigen Punkt des Audio Domes verschieben. Danach wurde das Script an das Objekt angefügt (Abb. 15) und es musste nur noch die Geschwindigkeit eingestellt werden. Wenn man nun das Programm laufen lässt, rotiert die Kugel auf dem Radius des Domes durch den Raum.



**Abbildung 13** Kugel mit angehefteter Audio Source

```

1  using System.Collections;
2  using System.Collections.Generic;
3  using UnityEngine;
4
5  public class SoundSourceRotator : MonoBehaviour
6  {
7      public float speed;
8
9      // Update is called once per frame
10     void Update()
11     {
12         transform.Rotate(speed * Time.deltaTime, speed * Time.deltaTime, 0);
13     }
14 }
15

```

Abbildung 14 Script für die Rotation der Kugel

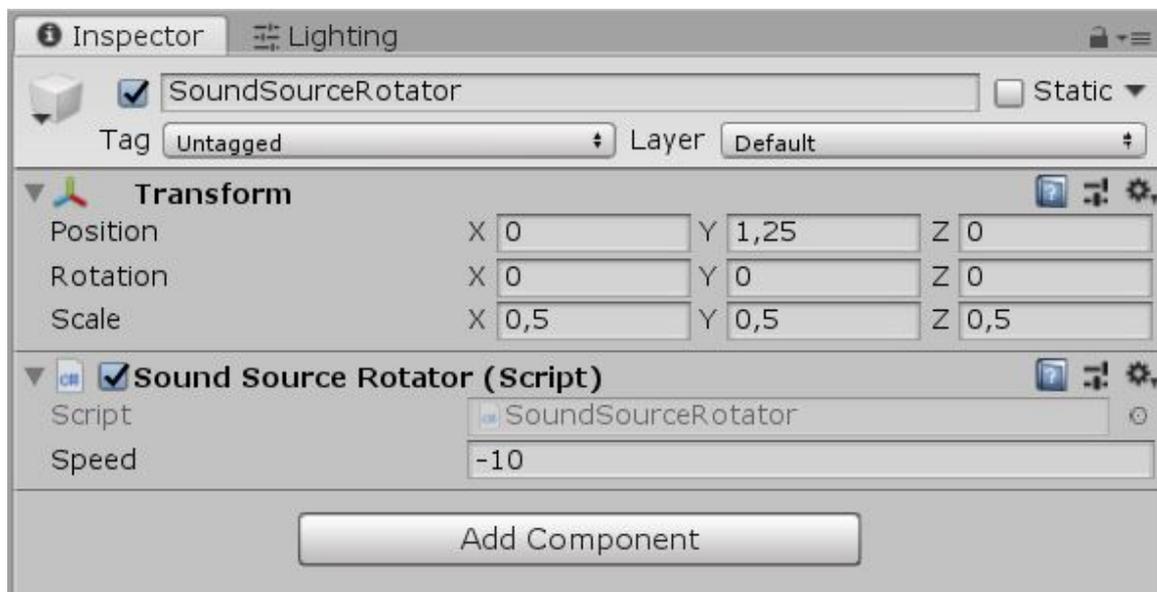
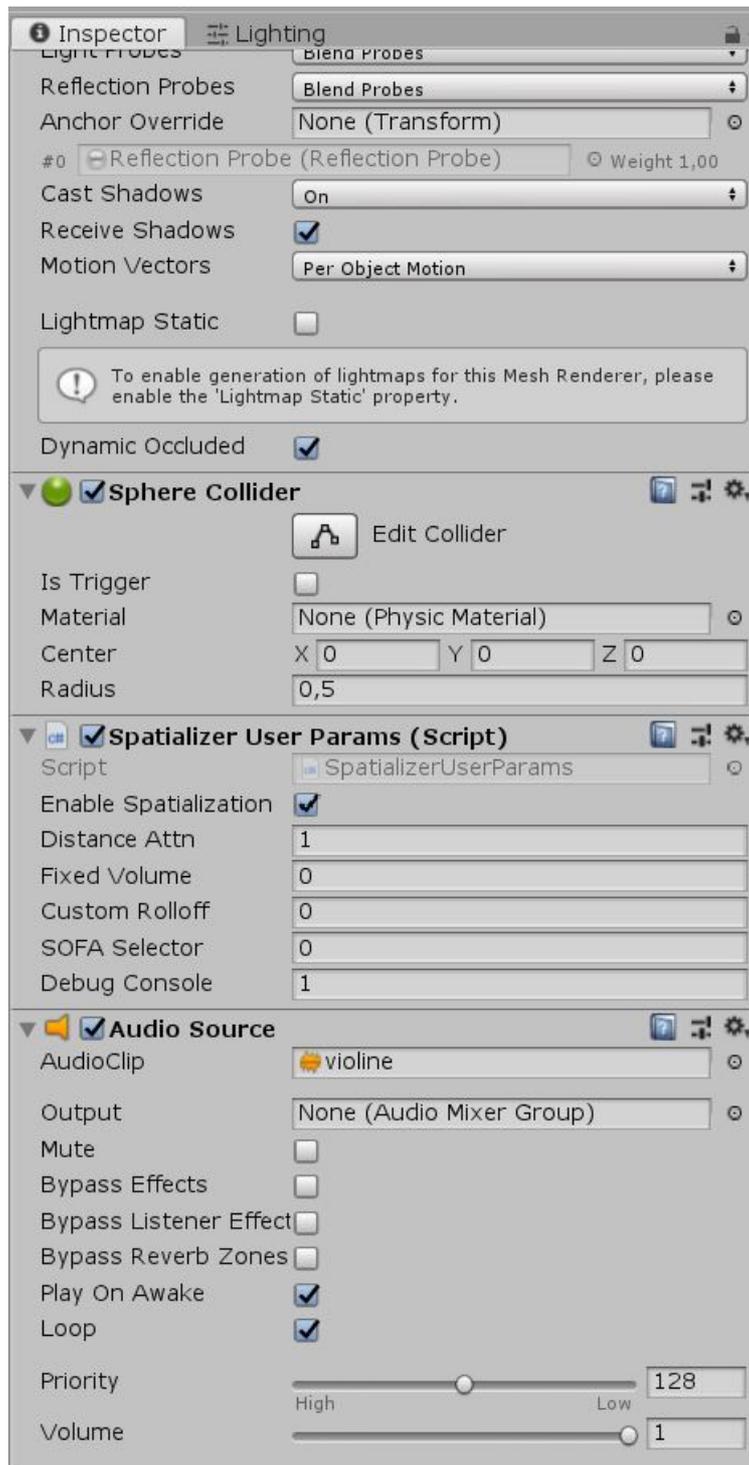


Abbildung 15 Geschwindigkeitseinstellung für die Rotation



**Abbildung 16** Einstellungen der Kugel mit dem SOFAlizer Script "SpatializerUserParams"

Der große Vorteil dieses Lösungsansatzes ist, dass die Kerneigenschaft des 3D Sounds wiedergegeben werden kann. Der Sound bewegt sich im Raum und kann jede Position auf dem Dome einnehmen. Außerdem besteht durch den SOFAlizer die Möglichkeit eigene HRTF Datensätze einzugeben.

## 4.2 SOFAlizer

Eine Lösung des auf Seite 28 beschriebenen Problems liefert das Plugin SOFAlizer, welches es ermöglicht, für jede Person die individuellen HRTF-Werte einzugeben. Dieser Schritt ist nötig, um das Audioerlebnis für jede Person noch realistischer zu machen. Man hat die Möglichkeit bis zu zehn verschiedene SOFA Datensätze zu importieren und in Echtzeit zwischen diesen zu wechseln.

Diese Möglichkeit der Verbesserung des Audio Erlebnisses wurde in den zweiten Lösungsweg eingearbeitet, da die beiden Audio Plugins Resonance Audio und SOFAlizer nicht gleichzeitig verwendet werden können.

### Installation und Ausführung<sup>78</sup>

Der SOFAlizer ist ein Plugin, das von drei Wiener Studenten programmiert wurde. Es ist nur für Windows und Unity erhältlich.

Für die Installation muss die Datei zuerst in Visual Studio geöffnet und dort rebuildet werden. Dann kann man erst die Beispiel Szene öffnen und ausprobieren. Dafür muss man noch SOFA files in den Pfad des Projektes importieren und in hrtfX.sofa mit X von 0 bis 9 umbenennen. Wenn man nun die Szene laufen lässt wird jeder HRTF Satz auf die in dem Unity Projekt eingestellte Sample Rate gesetzt und auf eine Länge von 256 Samples gekürzt (Abb. 17). Nun muss man nur noch in den Audio Settings das Spatializer Plugin auf SOFA Spatializer einstellen (Abb.18) und danach kann man sich in der Beispiel Szene den Sound mit den unterschiedlichen HRTFs anhören. Die Steuerung, um zwischen den verschiedenen Datensätzen zu springen, erfolgt über die Tasten 0 bis 9. Sollte die gewählte SOFA Datei nicht vorhanden sein oder wurde sie nicht korrekt geladen, dann wird der Sound stummgeschaltet.

---

<sup>7</sup> <https://github.com/sofacoustics/SOFAlizer-for-Unity>

<sup>8</sup> <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=19519>

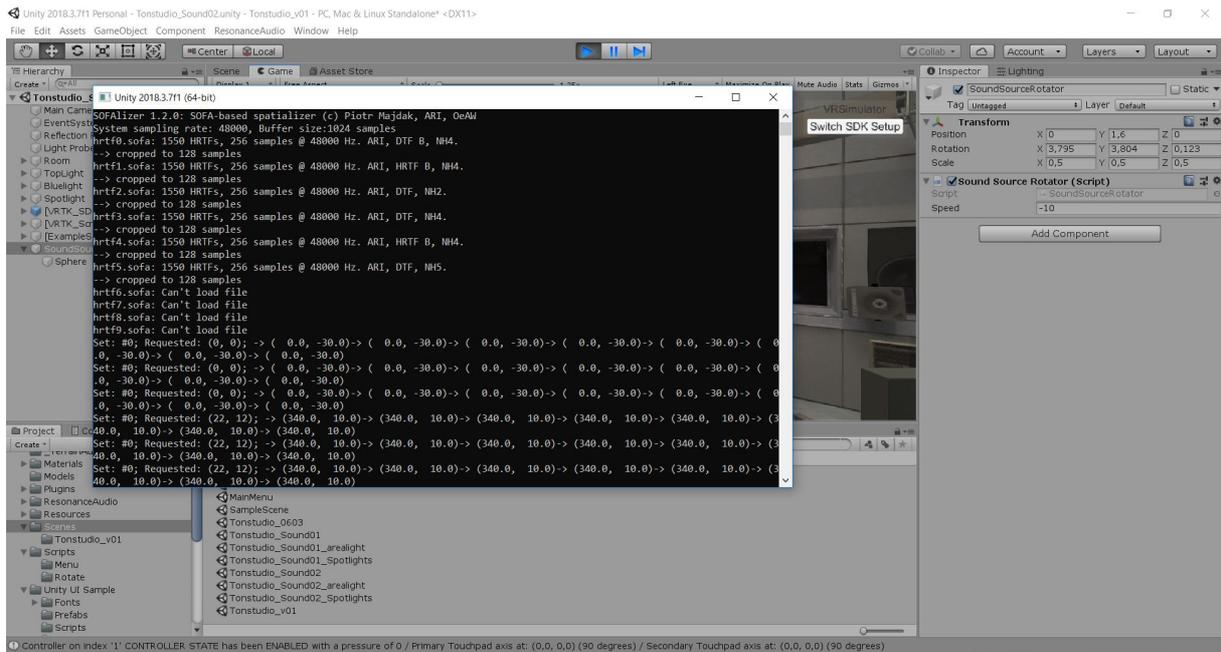


Abbildung 17 Änderung der HRTF Datensätze in dem Pop-up Fenster

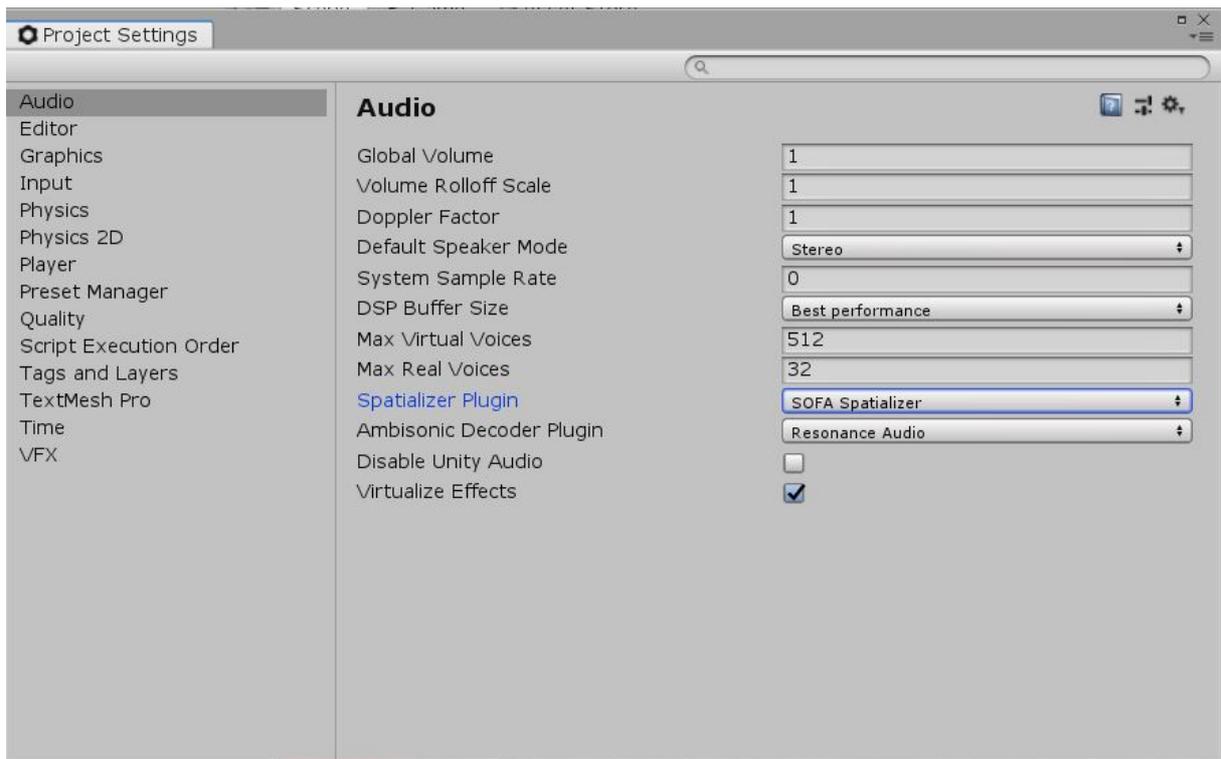


Abbildung 18 Audio Einstellungen in Unity

Um dieses Plugin in das zweite Audio Setup einzubauen, wurden zuerst die Dateien des SOFAlizers in den Pfad des Projektes importiert, damit der Zugriff auf alle benötigten Daten erfolgen konnte. Anschließend wurde der Audio Source das Script „Spatializer User Params“ angefügt (Abb. 16). Für eine noch größere Auswahl an HRTFs wurden zusätzlich zu den drei vorhandenen Datensätzen drei weitere aus dem Internet heruntergeladen und abgespeichert. Hierbei handelt es sich um die HRTF Datensätze von Probanden aus der ARI Datenbank des Institut für Schallforschung (ISF) an der Österreichischen Akademie für Wissenschaften (ÖAW), die mit einem in-the-ear Mikrophon ausgemessen wurden.<sup>9</sup> Verwendet wurden die Dateien NH2, NH4 und NH5.<sup>10</sup>

Wenn man jetzt die Szene laufen lässt, kann man mit den Tasten 0-5 zwischen den sechs verschiedenen Möglichkeiten wechseln.

Die Möglichkeit seine individuelle HRTF einzugeben, bzw. zwischen sechs verschiedenen Datensätzen auswählen zu können, macht das zweite Audio Setup realistischer. Ein weiterer Punkt, der für die zweite Variante spricht ist, dass man die Funktionsweise von einem 3D-Audio-System am besten rekonstruieren kann.

---

<sup>9</sup><https://www.kfs.oeaw.ac.at/index.php?view=article&id=608&lang=de#inear>

<sup>10</sup>[https://www.kfs.oeaw.ac.at/research/experimental\\_audiology/hrtf/database/hrtfltESOFAb.html](https://www.kfs.oeaw.ac.at/research/experimental_audiology/hrtf/database/hrtfltESOFAb.html)

## 4.3 Lichtstimmungen

Ein großer Faktor in der Wahrnehmung von Räumen ist das Licht.

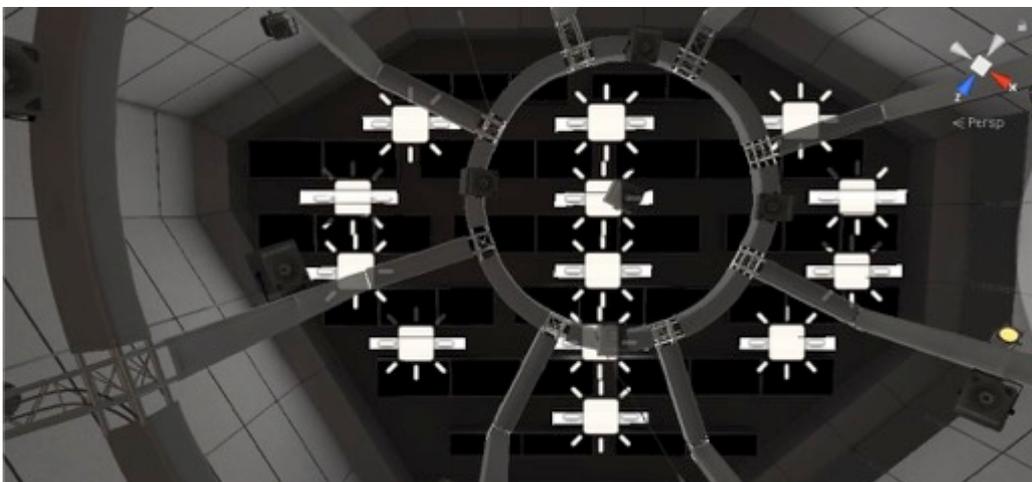
Da es in dem „Immersive Audio Lab“ installierte Leuchten mit unterschiedlich einstellbaren Lichtstimmungen gibt, sollten diese auch als virtuelle Leuchten in das Modell eingebaut werden. Dieses Vorhaben war auch einer der Gründe, warum es so wichtig war ein neutrales 3D-Modell zu erstellen, in dem die Lichtstimmung nicht schon fest eingebaut ist. In dem neutralen Modell können nun die Leuchten einzeln eingestellt werden, sodass sie möglichst den realen Lichtverhältnissen entsprechen.

### Zielsetzung

Das Ziel dieses Kapitels ist, dass die virtuellen Leuchten so verstellbar sind, dass sie die real vorhandene Lichtstimmung auch in Unity und somit in Virtual Reality wiedergeben können.

### Umsetzung in Unity

Da von Anfang an klar war, dass die Leuchten veränderbar sein sollten, wurde auch ein großer Fokus auf die Modellierung und Einrichtung jeder einzelnen Leuchte gelegt. In dem Unity Projekt ist jede Leuchte als einzelnes Objekt integriert und bereits als light source gekennzeichnet (Abb. 19). Nun kann man die Parameter für jedes Licht einstellen (Intensität, Richtung, Farbe, Abb. 20/21).



**Abbildung 19** Deckenbeleuchtung in Unity

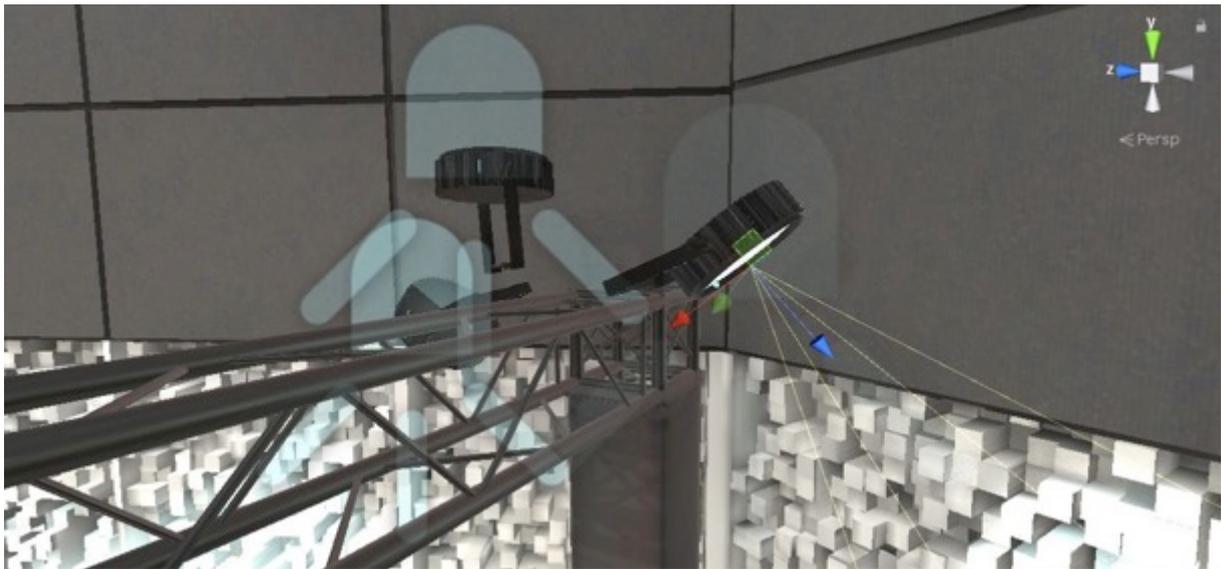


Abbildung 20 Verknüpfung von digitalem Licht mit dem Modell der Leuchte

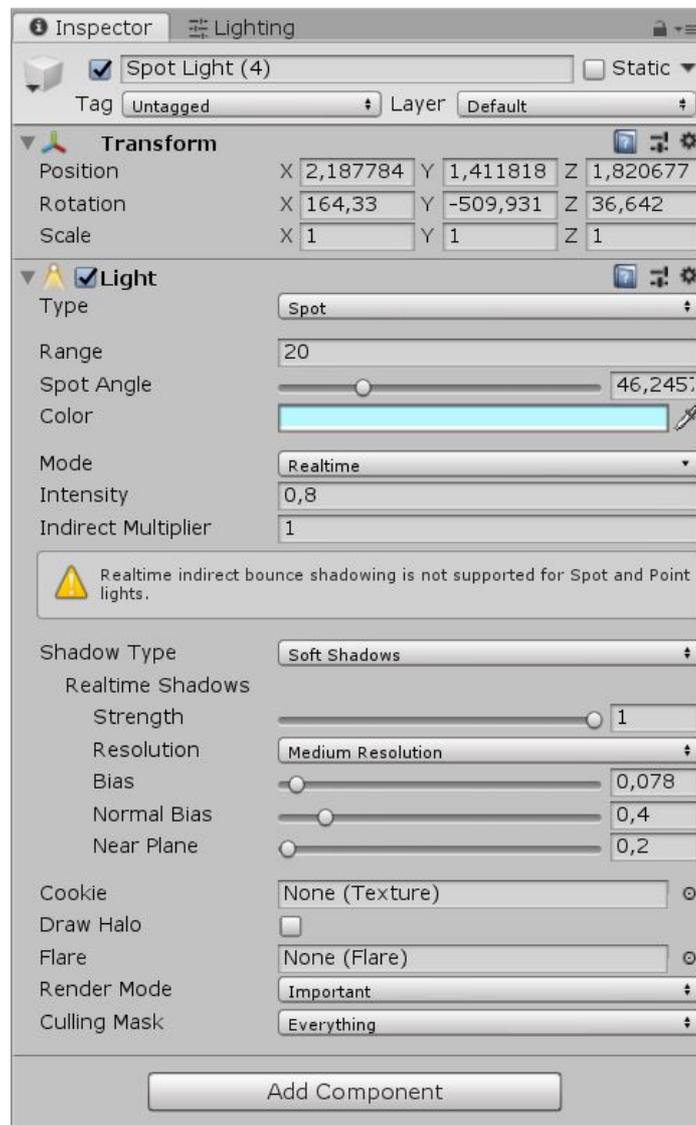


Abbildung 21 Einstellungen der Parameter einer Leuchte in Unity

## 4.4 User Interface

Da nun zwei verschiedene Versionen für den Sound vorlagen, wurde ein User Interface programmiert, um das digitale Raummodell noch variabler nutzen zu können. Das Interface trägt zur leichteren Bedienung des Modells bei und ermöglicht dem Nutzer sich zuerst zwischen den beiden Setups entscheiden zu können.

Das Interface ist so aufgebaut, dass man sich im ersten Menü (Abb. 22) zwischen drei Auswahlmöglichkeiten entscheiden kann. Man kann entweder eines der beiden Soundsetups wählen oder durch Betätigen des Quit Buttons die Anwendung schließen. Sollte man sich für einen der ersten beiden Knöpfe entscheiden, erscheint ein weiteres Menü (Abb. 23). Hier hat man nochmal die Möglichkeit zwischen zwei verschiedenen Lichtstimmungen zu wählen oder durch den Back Button wieder zurück zum Hauptmenü zu gelangen. Die verschiedenen Lichtstimmungen gibt es, damit der Benutzer hierdurch besser auf die reale Situation eingehen kann. Bei der ersten Lichtstimmung ist nur die Deckenbeleuchtung an, bei der zweiten sind alle in dem Raum vorhandenen Leuchten an. Je nach vorhandener realer Lichtstimmung oder Präferenzen des Benutzers kann hier zwischen den beiden Möglichkeiten ausgewählt werden.



**Abbildung 22** Hauptmenü mit der Auswahlmöglichkeit zwischen zwei Audio Setups



**Abbildung 23** Audiomenu mit der Auswahlmöglichkeit zwischen zwei Lichtstimmungen

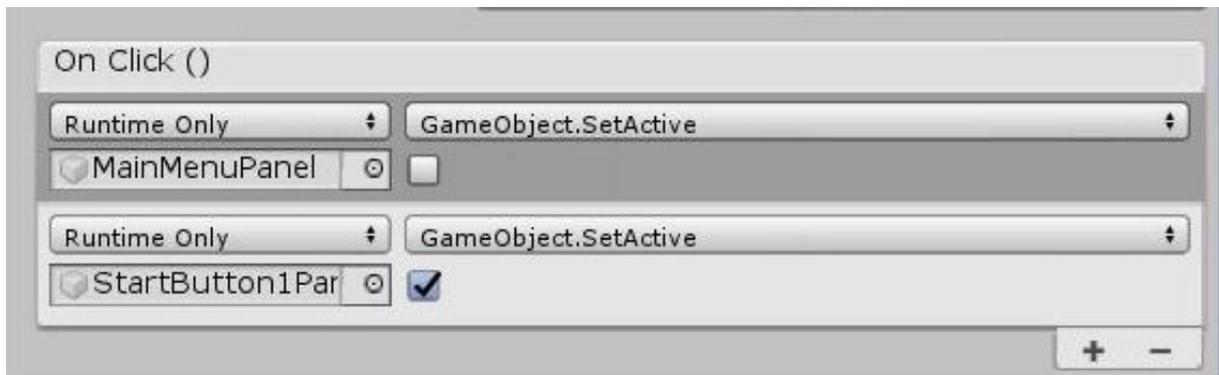
Um dieses Interface programmieren zu können, musste zuerst ein User Interface Asset (Unity Samples:UI<sup>11</sup>) im Unity Asset Store heruntergeladen werden und ein neues Projekt geöffnet werden. In dem Asset Paket waren z.B. schon die Vorlagen und Designs für die Buttons vorhanden.

Nun konnte ein Hintergrundbild in die Szene geladen werden. Damit dieses zu dem 3D-Modell passte, wurde ein passender Screenshot von einer Kameraeinstellung gewählt. Als nächstes musste ein Canvas und ein Eventsystem eingefügt werden. Das Canvas (deutsch Leinwand) ist das übergeordnete Game Object, dem eine „Leinwand“ zugeordnet ist. Alle weiteren UI-Komponenten sind „Kinder“ des Canvas. Danach wurde dem Canvas ein Panel zugeordnet, als Sprite eine der Vorlagen gewählt und die Farbeinstellungen angepasst. Als nächstes wurden dem Panel drei Buttons wieder aus den Vorlagen hinzugefügt und der Text wurde angepasst (Abb. 22).

Zu diesem Zeitpunkt hat man bereits das fertige Interface Menu, allerdings passiert noch nichts, wenn man die Buttons betätigt. Um das zu erreichen, wurde zuerst auf dieselbe Art ein weiteres Interface erstellt (Abb. 23). Nun wurde an den Button für das Audio Setup 1 zwei On Click Events angefügt mit den beiden Events die ausgeführt werden sollen, also das Mainmenu und das Audiomenu 1 (Abb. 24). Außerdem wurde in dem Dropdown Menu „GameObject.SetActive“ ausgewählt. Nun

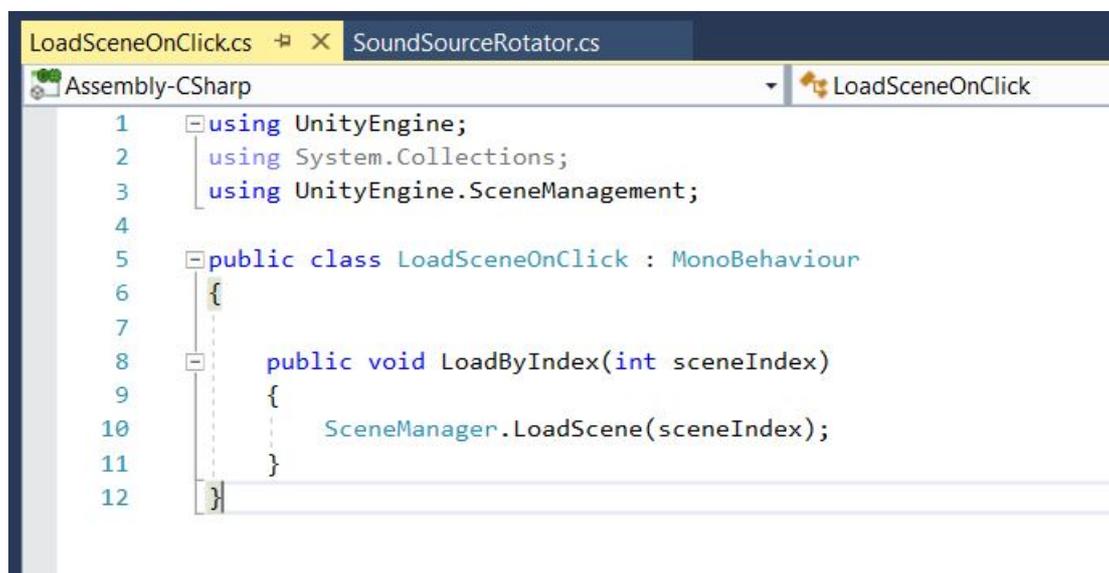
<sup>11</sup> <https://assetstore.unity.com/packages/essentials/unity-samples-ui-25468>

kann man neben den Panels eine Box true oder false setzen. Ist die Aktion false wird weiterhin das Mainmenu ausgeführt, sollte die Aktion true sein, was der Fall ist, wenn wir den Button drücken, dann wird das Audiomenu ausgeführt.



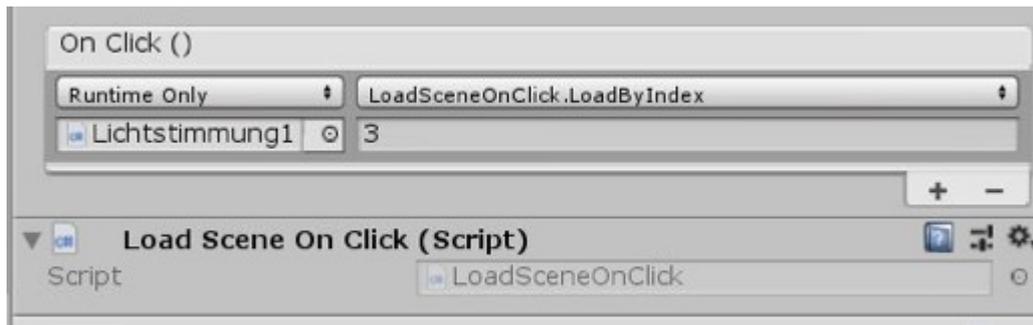
**Abbildung 24** On Click Events des Audio Setup 1 Buttons

In dem Audiomenu kann man nun zwischen den beiden Lichtstimmungen wählen und dann sollte die jeweilige Szene ausgeführt werden. Um das zu realisieren musste ein kurzes Script geschrieben werden (Abb. 25). Dieses sorgt nun dafür, dass eine bestimmte Szene mit einem bestimmten Index geladen wird.



**Abbildung 25** Script für das Laden einer Szene

Im folgenden kann dieses Script an den Button angefügt werden und ein On Click Event mit diesem Script erstellt werden (Abb. 26). Dort kann nun die Indexzahl der gewünschten Szene eingegeben werden und diese wird dann geladen.



**Abbildung 26** On Click Event für das Laden einer Szene

Die Möglichkeit Szenen einen bestimmten Index zuzuordnen bekommt man in den Built Settings (Abb. 27). Hier kann man jede beliebige Szene des Projektes hinzufügen, sodass jede einen Index hat, mit dem sie aufgerufen werden kann.



**Abbildung 27** Built Settings in Unity

Der Back Button wurde ähnlich wie die Audio Setup Buttons programmiert. Es wurden zwei On Click Events zugefügt die jeweils „GameObject.SetActive“ ausgewählt haben. Dann wurden die beiden Möglichkeiten AudioSetupPanel und Mainmenupanel false und true gesetzt.

Für den Quit Button musste wieder ein neues Script (Abb. 28) programmiert werden. Das Script besagt, dass solange der Zustand false ist, also solange der Button nicht gedrückt wurde, die laufende Szene weitergespielt werden soll. Falls der Zustand nicht mehr false, also true, ist, soll die Applikation abgebrochen werden. Als nächstes wurde das Script „Quit On Click“ an den Button angefügt, damit es über ein neues On Click Event aufgerufen und ausgeführt werden kann (Abb. 29).

```
1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3
4 public class QuitOnClick : MonoBehaviour
5 {
6
7     public void Quit()
8     {
9         #if UNITY_EDITOR
10             UnityEditor.EditorApplication.isPlaying = false;
11         #else
12             Application.Quit ();
13         #endif
14     }
15
16 }
```

Abbildung 28 Script für das Abbrechen einer Anwendung



Abbildung 29 On Click Event für das Quit Script

Durch die Programmierung des Interfaces ist es einfacher geworden die Anwendung zu benutzen und vor allem zwischen den beiden Audio Setups zu wählen. Die Möglichkeit zwei verschiedene Lichtstimmungen zu benutzen ist ein Aspekt, der den Vergleich zwischen dem realen und dem virtuellen Raum vereinfacht.

## 5. Ergebnis

Ziel dieser Bachelorarbeit war, einen virtuellen Raum zu erschaffen, der sowohl visuell als auch auditiv vergleichbar mit dem realen Raum ist.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde der Raum zuerst visuell digitalisiert. Dazu wurde der gesamte Raum durch einen 3D-Laserscanner und Fotografien erfasst. Die aufgenommenen Daten wurden so weiterverarbeitet, dass ein dreidimensionales Modell in dem Programm Unity entstand. Dort kann es nun durch eine Virtual Reality Brille betrachtet werden.

An das visuelle Modell der 3D-Audio-Anlage wurde ein digitales auditives Modell gekoppelt. Auf diese Weise lässt sich der gesamte Raum mit sowohl den visuellen, als auch den auditiven Aspekten virtuell erleben.

Die Verknüpfung von dem 3D-Modell, welches visuell auf uns wirkt, mit der auditiven Komponente verstärkt das Realitätsempfinden. Der Raum kann auf diese Weise noch immersiver erlebt werden. Ein weiterer positiver Aspekt des 3D-Modells ist die hohe Genauigkeit (zu 99% maßstabsgetreu). Wenn man sich in dem realen Raum befindet und den virtuellen Raum durch die Virtual Reality Brille betrachtet, kann man also die verschiedenen Objekte und Eigenschaften des Raumes eins zu eins betrachten.

Jedoch wirkt das 3D-Modell nicht ganz realistisch. Man kann immer noch deutlich erkennen, dass die Objekte modelliert wurden und besonders die Tatsache, dass die 3D Grafik in Unity noch nicht ganz ausgereift ist, lässt das Modell etwas unscharf erscheinen.

Auch das Problem, dass die Skalierung, wenn man sich das Modell durch eine Virtual Reality Brille anschaut, nicht ganz übereinstimmt, konnte noch nicht gelöst werden.

Das 3D-Modell ermöglicht es für den Betrachter, auf Grund seiner Genauigkeit, ein sehr gutes Raumgefühl zu erleben. Das heißt der Betrachter kann sich ohne den Raum zu kennen ein sehr gutes Bild von den Abmessungen und akustischen Besonderheiten des Raumes machen. Auf Grund der Unschärfe des Modells wirkt es

aber immer noch „virtuell“. Auch wirkt sich ungünstig aus, dass trotz der hohen Auflösung des digitalen Scans einige Details verloren gehen und dadurch das virtuelle Bild im direkten Vergleich mit der Realität nicht hundert Prozent übereinstimmt. Insbesondere die nachträgliche Modellierung der Oberflächen mit Texturen berücksichtigt nicht die in der Realität vorkommenden Unebenheiten (z.B. Stofffalten). Diese fehlenden Imperfektionen führen zu einem geringeren Realitätsempfinden.

## 6. Ausblick

Auch in Zukunft kann dieses Modell für weitere studentische Projekte verwendet werden. So kann weiterhin an der Modellierung gearbeitet werden. Da alle Daten, die aufgenommen wurden, archiviert wurden (ca. 400GB), kann man aus diesen, falls sich die Grafik in Unity in Zukunft verbessern sollte, ein überarbeitetes Modell erstellen. Auf Grund der Genauigkeit des Modells kann der Raum genau vermessen werden.

Eine weitere Verbesserung, die vorgenommen werden kann, ist die richtige Programmierung der 3D-Audio-Anlage. In einem weiteren Projekt könnte die Anlage in Unity, oder einem anderen Programm, so programmiert werden, dass sie exakt wie in der Realität arbeitet.

Da das Projekt in Unity nur eine Größe von ca. 4GB hat, besteht die Möglichkeit, dieses auf einem Laptop überall mit hinzunehmen. Auf diese Art und Weise kann das „Immersive Audio Lab“ auch außerhalb des Hochschulgebäudes erlebt und gezeigt werden.

## Literaturverzeichnis

Archi CGI (2016): *What is 3D Modelling? Things you've got to know nowadays*  
<https://archicgi.com/3d-modeling-things-youve-got-know/>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019

Kraus, Karl (2004): *Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Fotografien und Laserscanneraufnahmen*

Florida Laser Scanning (o.J.): *History of Laser Scanning*  
<http://floridalaserscanning.com/3d-laser-scanning/history-of-laser-scanning/>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019

Laser Scanning Europe (2013): *Funktionsweise eines Laserscanners*  
<https://www.laserscanning-europe.com/de/glossar/funktionsweise-eines-laserscanners>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019

Linearis 3D (o.J.): *Wie funktioniert die Photogrammetrie?*  
<https://www.linearis3d.de/wie-funtioniert-photogrammetrie-FAQ.html>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019

Jenny, Claudia; Majdak, Piotr; Reuter; Christoph (2018): *SOFA Native Spatializer Plugin for Unity – Exchangeable HRTFs in Virtual Reality*, AES Convention e-Brief 406, AES Convention 144, Milan, Italy, 2018

Sengpiel Audio (1995): *Kopfbezogene Übertragungsfunktion HRTF*  
<http://www.sengpielaudio.com/KopfbezogeneUebertragungsfunktionHRTF.pdf>, zuletzt aufgerufen am 16.03.2019

## **Downloads:**

Resonance Audio SDK für Unity:

<https://github.com/resonance-audio/resonance-audio-unity-sdk/releases/tag/v1.2.1>

SOFALizer für Unity:

<https://github.com/sofacoustics/SOFALizer-for-Unity>

## **Tutorials:**

Rotation eines Objektes um einen Punkt:

<https://www.youtube.com/watch?v=iuvgipAigew>

Erstellen eines Interfaces:

<https://unity3d.com/de/learn/tutorials/topics/user-interface-ui/creating-main-menu>

User Interface Asset (Unity Samples:UI)

<https://assetstore.unity.com/packages/essentials/unity-samples-ui-25468>

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

**Ort, Datum**

**Unterschrift**