

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

Fakultät Electronic Media – Hochschule der Medien Stuttgart

Klang der Elektromobilität, dessen Bedeutung und Chance für urbane Soundscapes

Vorgelegt von: Udo-Csaba Waldeck (28938)

Am: 17. April 2018

Zu erlangender akademischer Grad: Bachelor of Engineering

Erst-Prüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweit-Prüfer: Felipe Sanchez Luna

Kling Klang Klong GmbH

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Udo-Csaba Waldeck, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Klang der Elektromobilität, dessen Bedeutung und Chance für urbane Soundscapes“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wort-laut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, den 17. April 2018

Udo-Csaba Waldeck

Kurzfassung

Diese Arbeit führt in das Thema urbaner Soundscapes ein und definiert grundlegende Begriffe, die zum klaren Verständnis der Thematik notwendig sind. Aufgrund des verstärkten Aufkommens elektrischer Fahrzeuge und einer Gesetzgebung, die aus Sicherheitsgründen eine Klangabstrahlung dieser fordert, stellt sich die Frage, wie diese Entwicklung urbane Soundscapes beeinflusst. Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine VR-App erstellt, die die Bedeutung der Elektromobilität für urbane Soundscapes veranschaulicht und zeigt, dass eine Soundscapebeurteilung mit den gewählten Mitteln möglich und sinnvoll ist. Durch Ergebnisse der Lärmforschung, Überlegungen – gestützt durch neue Technologien – und Erfahrungen aus der App-Nutzung wurde weiterhin deutlich, dass die ab Juli 2019 in Europa in Kraft tretende Verordnung nur eine Übergangslösung darstellen sollte. Technische Neuerungen stellen Möglichkeiten in Aussicht, die Sicherheit im Straßenverkehr auf andere Art und Weise zu gewährleisten. In Anbetracht der vielen Vorteile eines hi-fi Soundscape für den Menschen sollten diese genutzt werden. Durch die Weiterentwicklung der App würde man ein ergiebiges Werkzeug erhalten, um geplante Interventionen in Soundscapes aus Sicht der Betroffenen zu erproben.

Abstract

This thesis introduces the topic of urban soundscapes and defines necessary basic concepts for a clear understanding of the subject. Due to the increasing numbers of electric vehicles and new legislations that require the emission of sound for safety reasons, the question arises how this development influences urban soundscapes. To answer this question, a VR-app was created, which illustrates the importance of electromobility for urban soundscapes and shows that a soundscape assessment with the chosen means is possible and useful. The results of noise researchers, reflections based on new technologies and experiences from app usage made it clear that the regulations, which will come into force in Europe in July 2019, should only be a temporary solution. Technical innovations are already offering opportunities to ensure traffic safety in other ways. Given the many benefits of a hi-fi soundscape for humans, these should be explored. The further development of the app would create a useful tool to test planned soundscape interventions from the point of view of the affected people.

Inhaltsverzeichnis

<u>Eidesstattliche Erklärung.....</u>	<u>2</u>
<u>Kurzfassung.....</u>	<u>3</u>
<u>Abstract.....</u>	<u>3</u>
<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>4</u>
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	<u>5</u>
<u>1. Einleitung</u>	<u>6</u>
<u>2. Soundscape</u>	<u>7</u>
2.1 Akustische Umgebung	7
2.2 Definition Soundscape	11
2.3 Wahrnehmung von akustischen Umgebungen.....	15
2.4 Wandel der Soundscapes	19
<u>3. Klang der Elektromobilität</u>	<u>23</u>
<u>4. Virtual Reality- Applikation.....</u>	<u>28</u>
4.1 Konzept.....	30
4.2 Umsetzung	30
4.2.1 Erstellung eines Stadtviertels in Unity.....	31
4.2.2 Programmierung und Skripte	36
4.2.3 Audio Implementation	39
4.2.4. Steam Audio.....	47
4.3 Auswertung und Erweiterungsmöglichkeiten.....	47
<u>5. Fazit</u>	<u>52</u>
<u>Literaturverzeichnis.....</u>	<u>53</u>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfache Grundeinteilung in 3 Kategorien.	9
Abbildung 2: Erweiterte Einteilung für urbane akustische Umgebungen.	10
Abbildung 3: Kontext	16
Abbildung 4: Kontext im Detail.....	17
Abbildung 5: Lärm und gesundheitliche Folgen in Abhängigkeit der Zahl Betroffener.	22
Abbildung 6: Zusammensetzung des Fahrgeräusch.	23
Abbildung 7: Fahrgeräuschzusammensetzung über Fahrgeschwindigkeit und Motorlast.....	24
Abbildung 8: Marktanteile von Elektroautos.....	25
Abbildung 9: Mindestschallpegel des AVAS	26
Abbildung 10: Smartphone-Nutzung von Fußgängern	27
Abbildung 11: Unity Editor; Stadtviertel von oben.....	33
Abbildung 12: Unity Editor; Fahrzeuge.	34
Abbildung 13: Unity Editor; GameObject Hierarchie.....	35
Abbildung 14: Microsoft Visual Studio; Auszug aus Programmcode des CarController Scripts.....	37
Abbildung 15: Microsoft Visual Studio; Programmcode des Atmocubeswitch Script. 38	
Abbildung 16: Unity Editor; 8-Kanal Grundatmo.	42
Abbildung 17: Unity Editor; Vogelklänge und Blätterrauschen.....	43
Abbildung 18: Microsoft Visual Studio; CarEngineAudio Script.	45
Abbildung 19: FMOD Event Editor; Auszug Verbrenner Sounddesign.	46

1. Einleitung

Wir stehen momentan am Scheideweg zwischen Vergangenheit und Zukunft, was die klangliche Erfahrung unserer Umwelt – vor allem im urbanen Raum – betrifft. Die Ablösung des Verbrennungsmotors durch einen elektrischen schreitet voran (Focus Online 2017), weshalb Lösungen gefunden werden müssen, um diesen Wechsel sinnvoll und nachhaltig zu gestalten. Ein Zeichen des Wandels sieht man beispielsweise an der Verordnung Nr.540/2014 (EU-Parlament und Rat 16.4.2014) des Europäischen Parlaments, welche ab 1. Juli 2019 in Kraft tritt und unter anderem den Einbau eines „Acoustic Vehicle Alerting System“ (AVAS) in jedes neue Hybridelektro- und Elektrofahrzeug verlangt. Dadurch besteht vor allem auch in der Automobilindustrie großes Interesse an der Frage, wie man sich dieser Verordnung anpasst oder die neuen Anforderungen positiv nutzt. Um Markenpräsenz und Wiedererkennungswert hoch zu halten, endet dies meist mit der Suche nach dem perfekten Klang des neuen „E-Cars“. Betrachtet man jedoch diese Entwicklung aus etwas mehr Abstand, kommt bald die Frage auf, wie sich das auf ein ganzes Stadtviertel oder gar auf eine ganze Stadt auswirkt, wenn die heutige Überzahl an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor von elektrischen – eventuell sogar autonom fahrenden Fahrzeugen – abgelöst wird. Deshalb stellt sich aus der Sicht des Autors eher die Frage, ob ein Elektroauto überhaupt klingen soll und wie Menschen ihre akustische Umgebung wahrnehmen. Was würde uns entgehen, wenn wir aus Sicherheitsgründen den pragmatischen Weg der Verordnung Nr.540/2014 gehen? R. Murray Schafer hat schon in den 1970er-Jahren die Grundsteine für die heutige Forschungsrichtung „Acoustic Ecology“ (Schafer 1994, S.205) gelegt und den Begriff „Soundscape“ definiert. Seine Arbeit warf einen Fokus auf die durch die industrielle Revolution stark veränderte klangliche Umwelt, vor allem bezüglich in Städten lebender Menschen, die bis heute andauert und nachweislich zu Stress und anderen Gesundheitsrisiken führt (Europe 2011, S. 1). Was würde das Vorantreiben der Wiederherstellung eines annähernd präindustriellen Soundscapes für jede Stadt bewirken? Welche Möglichkeiten würden sich eröffnen, wenn man bedenkt, dass der Hauptanteil an heutigen städtischen Soundscapes Verkehrslärm ist? In dieser Arbeit wird das Forschungsfeld Soundscape genauer beleuchtet. Es werden verschiedene Szenarien mittels einer VR-Umgebung mit Binauralton erzeugt und immersiv erlebbar gemacht. Dadurch soll ein Blick in eine eventuelle Zukunft geworfen werden, der die

Relevanz und Tragweite der Entscheidungen, die jetzt in diesem Zusammenhang anstehen, veranschaulicht.

2. Soundscape

Der Forschungsbereich, welcher sich mit Soundscapes oder akustischen Umgebungen befasst, ist breit gefächert. Die oft synonyme Verwendung verschiedener Begriffe kann zu Verwirrungen führen, da es auch genug Ausnahmen gibt, in denen auf einen anderen Bedeutungsinhalt verwiesen wird (Brown et al. 2011, S. 388). Möchte man beispielsweise den Begriff Soundscape in eine andere Sprache übersetzen, stößt man auf sprachliche Barrieren, die zum Teil die Ursache der Begriffsvielfalt und für deren unterschiedliche Interpretationen sind (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 9), was die Problematik der Kommunikation in diesem Forschungsfeld unterstreicht. Die ursprüngliche Wortneuschöpfung aus „sound“ und „landscape“ geht auf Murray Schafer zurück, der als Urvater der Soundscapeforschung gilt. Er hat den Begriff in der Fachliteratur etabliert und das Konzept „Sound“ mitinitiiert, das alles Hörbare umfasst, wie zum Beispiel Sprache, Klänge und jegliches Geräusch (Schafer 2010, S. 14 ff.). Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit bewusst auf die aktuell oft verwendete deutsche Übersetzung von Soundscape in „Klanglandschaft“ verzichtet. Im Folgenden soll eine weitere, genauere Abgrenzung der Verwendung relevanter Begriffe und eine tiefere Einführung in das Forschungsfeld Soundscape erfolgen, damit spätere Bedeutungszusammenhänge im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit entstehen können.

2.1 Akustische Umgebung

Wir sind zu jeder Zeit von einer Vielzahl von Geräuschen oder Klängen umgeben, unabhängig davon an welchem Ort wir uns befinden. Selbst in einem schalltoten Raum hören wir da der Hörsinn nicht so einfach vom hörenden Menschen abgekoppelt werden kann mindestens unseren Atem oder das durch unseren Körper pulsierende Blut (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 1–2). Was genau wir hören, ist vielfältig und abhängig vom jeweiligen Ort, an dem wir uns befinden. Beispiele dafür sind verschiedene Tiere, das Wetter, andere Menschen um uns herum oder technische Geräte, die wir tagtäglich nutzen. Hörschall, der hier ganz ohne subjektive Bewertung als für den Menschen hörbare Schwingung eines elastischen Mediums verstanden

werden soll (Dickreiter 2014, S. 1), ist immer noch ein immens wichtiger Kommunikationsweg für Menschen. Sei es bezüglich der zwischenmenschlichen oder Mensch-Maschine-Kommunikation, wobei die Sprache einen sehr hohen Stellenwert aufweist. Sogar im Schlaf bleibt der Hörsinn aktiv (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 1–2). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass wir uns einen akustischen Raum mit allem und jedem teilen, der sich in unserer Hörreichweite befindet. Diese akustische Umgebung, oder auch oft im englischen als „acoustic environment“ bezeichnet (Brown et al. 2011, S. 388), soll in dieser Arbeit als wertungsfreie Zusammenfassung von allem für eine bestimmte Person Hörbarem, die sich an einem bestimmten Ort oder in einem bestimmten Raum befindet, verstanden werden. Veränderungen der physikalischen Beschaffenheit des Schalls entlang des Übertragungsweges von der Schallquelle bis zum Hörer charakterisieren die jeweilige akustische Umgebung genauer und beladen diese mit Informationen, auf die in einem späteren Kapitel über die Wahrnehmung von akustischen Umgebungen genauer eingegangen werden soll. Diese Veränderungen, die beispielsweise durch Reflexion, Brechung, Absorption und Dämpfung entstehen können, hängen stark von der Position des Hörers zur jeweiligen Schallquelle ab (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 2). Sehr viele Faktoren, die eine akustische Umgebung ausmachen, verändern sich in der realen Welt ununterbrochen und lassen sich bis ins kleinste Detail nur schwer reproduzieren. Dies erschwert eine Erforschung aller Aspekte einer komplexen akustischen Umgebung, wie zum Beispiel einer Straßenkreuzung in einer Stadt, da reale, exakt wiederherstellbare Voraussetzungen schwer zu leisten sind. Urbane akustische Umgebungen, deren Soundscapes ein wichtiges Thema dieser Arbeit sind, stellen eine Zwischenstellung der beiden Extremfälle der Beschreibung von Schallfeldern dar. Ein Schallfeld lässt sich in seiner simpelsten Form als das Medium beschreiben, welches eine Schallquelle umhüllt und durch diese zum Mitschwingen angeregt wird. Kann sich der Schall vollkommen ungehindert in jede Richtung ausbreiten und den Hörer ohne Hindernisse erreichen, spricht man vom freien Schallfeld. Ist dies nicht der Fall, wie zum Beispiel in einem geschlossenen Raum, spricht man von einem diffusen Schallfeld (Dickreiter 2014, S. 9). In der Natur gibt es oft nur den Untergrund als reflektierende Oberfläche, die für Schall ein Hindernis darstellt, wobei in Städten Hauswände von Gebäuden hinzukommen, was je nach Bebauung dazu führt, dass sich das Schallfeld einer urbanen akustischen Umgebung einem diffusen Schallfeld annähert. Weiterhin ist zu beachten, dass außerhalb von Gebäuden die Schallabsorption durch die Atmosphäre

und die Schallbeugung eine immer wichtigere Rolle spielt, je länger der Übertragungsweg zum Hörer ist (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 2). Da in der Literatur auch für eine akustische Umgebung, wie sie hier definiert wurde, verschiedene Begriffe verwendet werden, soll abschließend zum allgemeinen Verständnis eine Parallele zum Begriff der „Atmo“ aus der Tonaufzeichnungspraxis gezogen werden (Friesecke 2014, S. 193). Die Erforschung akustischer Umgebungen ist höchst relevant für verschiedene Disziplinen der Wissenschaft und angewandte Tätigkeitsfelder, wie beispielsweise Stadtplanung, Architektur, Landschaftsarchitektur, Veranstaltungstechnik, Akustik und Musik (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 2). Da die Einzigartigkeit von akustischen Umgebungen folglich durch die spezifische Zusammensetzung von Schallquellen in der jeweiligen Umgebung entsteht, ist es nützlich, diese einzeln zu erkennen und in Gruppen zusammenzufassen.

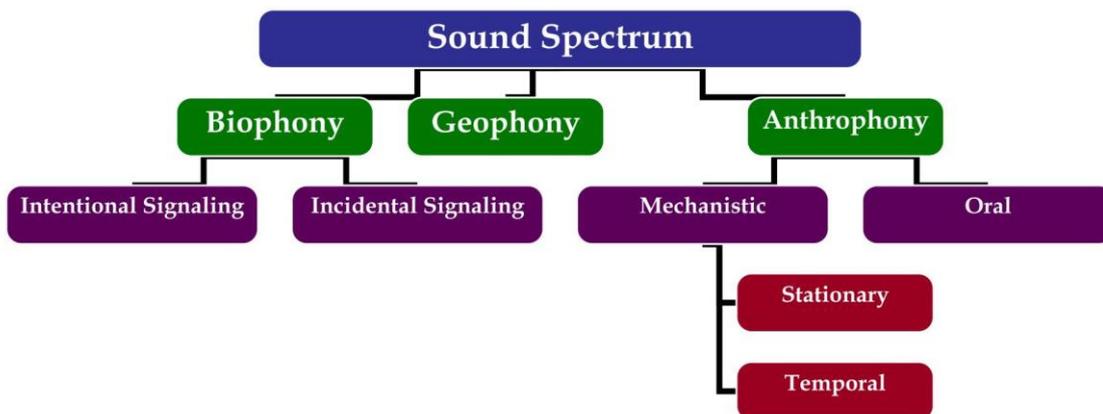


Figure 1: Taxonomy of Acoustics: Adapted from Napolentano (2004)

Abbildung 1: Einfache Grundeinteilung in 3 Kategorien. (Gage et al. 2004)

Wie im System nach Gage et al. (2004) in Abbildung 1 zu sehen, kann man Schallquellen in "Biophony", Quellen biologischen Ursprungs (z.B. Tiere, Insekten), "Geophony", Quellen nicht biologischen Ursprungs, die auf physikalischen Prozessen beruhen (z.B. Wetterphänomene, Wasserwellen) oder "Anthrophony", Schallquellen menschlichen Ursprungs, unterteilen. Für eine städtische Umgebung ist die Untergliederung jedoch nicht feinteilig genug, da es eine zu große Palette an durch menschliche Aktivitäten erzeugte Schallquellen gibt (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 3).

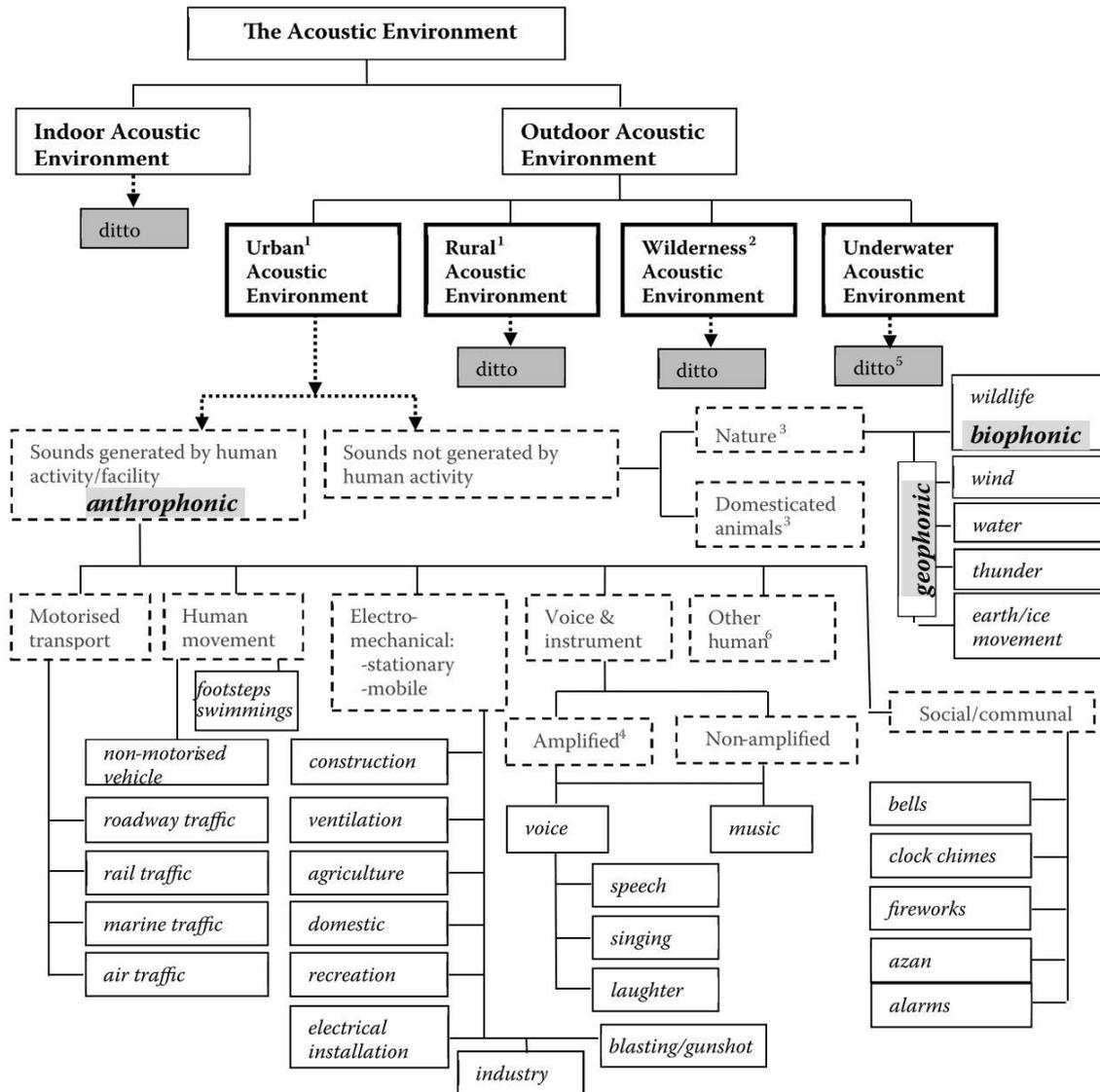


Figure 1.1 A classification scheme for categorizing sound sources in any acoustic environment that can be used to standardize sound source reporting across different studies. For each domain shown in bold boxes (urban, rural, wilderness, and underwater), there is an identical set of *categories of sound sources* shown in the dashed boxes, together with examples of *sound sources* in the different categories (solid boxes). (Modified from Brown et al., *Applied Acoustics* 72(6): 387–392, to include the anthrophonic, geophonic, and biophonic classifiers used by others.)

Abbildung 2: Erweiterte Einteilung für urbane akustische Umgebungen. (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 4)

Wenn man die Einteilung von Schallquellen nach Gage et al. (2004) aus Abbildung 1 um den Entwurf mit anthrophonischem Schwerpunkt von Brown (Brown et al. 2011, S. 390) erweitert, erhält man die Möglichkeit, alle Schallquellen, die in einer urbanen akustischen Umgebung vorhanden sein können, eindeutig einzuteilen. Die Idee

dahinter ist, eine allgemein gültige Nomenklatur bereitzustellen, die in verschiedensten Studien verwendet werden kann, um einen Vergleich und eine Auswertung verschiedener Ergebnisse zu erleichtern (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 3). Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird erst einmal in zwei Grundkategorien eingeteilt, ob es sich um eine Umgebung in einem Innenraum ("Indoor Acoustic Environment") oder einen Außenbereich ("Outdoor Acoustic Environment") handelt. Danach folgt eine Unterteilung der zwei Grundkategorien in je vier örtliche Kategorien. Damit wird klassifiziert, ob es sich um einen städtischen ("Urban Acoustic Environment"), dörflichen ("Rural Acoustic Environment"), naturbelassenen ("Wilderness Acoustic Environment") oder einen Ort unter Wasser ("Underwater Acoustic Environment") handelt. An diesem Punkt fließt dann die Kategorisierung in biophonisch, geophonisch und anthrophonisch ein, wobei die Unterscheidung zwischen anthrophonisch und nicht-anthrophonisch den anderen beiden Grundkategorien nach Gage et al. (2004) übergeordnet ist. Schließlich folgt die gruppierte Auflistung der Schallquellen selbst, die an dem jeweiligen Ort vorherrschen könnten (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 3).

2.2 Definition Soundscape

In folgendem Unterpunkt soll der Begriff Soundscape genau definiert und mit der akustischen Umgebung in Beziehung gebracht werden. Dazu werden vorerst die Ideen des Gründers der Soundscape-Forschung, Raymond Murray Schafer, betrachtet. Schafer, der einer breiten Öffentlichkeit eher als kanadischer Komponist bekannt war, setzte den Grundstein der heutigen Soundscapeforschung Mitte der 1960er-Jahre als Dozent an der Simon Fraser Universität bei Vancouver (Hannoschöck 2009, S. 39). Geprägt vom weit verbreiteten Umweltaktivismus der Zeit, der nicht zuletzt durch die noch wache Erinnerung an den Weltkrieg, das Wettrüsten der Supermächte und einer Verdrängung und Beschädigung der Natur durch die fortschreitende Technisierung aufkam (Hannoschöck 2009, S. 42), rief Schafer mit seinen Kollegen Anfang der 70er Jahre das „World Soundscape Project“ ins Leben. Das Ziel dieses von der UNESCO unterstützten Projektes war es, weltweit die akustische Umgebung verschiedener Orte oder Landschaften festzuhalten, zu analysieren und Entwicklungen über mehrere Jahre hinweg aufzuzeigen (Schafer 2010, S. 7). Diese und weitere Projekte mündeten in seinem erstmals 1977 erschienenen Werk „The soundscape - Our sonic environment and the tuning of the world“ (Schafer 1994), in welchem er Grundbegriffe

formulierte und Sachverhalte über Expertenkreise hinaus bekannt machte. Ausgangspunkt für Schafers Ideen war die Beobachtung, dass sich die westliche Gesellschaft seit der Renaissance mit der Erfindung der Druckmaschine und der perspektivischen Malerei immer stärker auf das Visuelle fixierte, was Wrightson als „eye culture“ (Wrightson 1999, S. 10) aufgriff. Er bestätigte Schafers Beobachtung, dass die Fähigkeit von Kindern und jungen Erwachsenen konzentriert und bewusst zuzuhören verkümmert sei, indem er analog zu Schafer seinen eigenen Schülern und Studenten einfachste Hör-Aufgaben stellte, die diese oft nicht zufriedenstellend erfüllen konnten. Die gestellten Aufgaben bestanden beispielsweise aus einer Aufzählung von fünf Klängen aus der Umgebung, die die Probanden an diesem Tag gehört hatten, die jedoch keine Musik sein sollten. Schafer fühlte sich durch das oft durchwachsene Ergebnis dieser „Tests“ bestätigt und arbeitete seine „ear-cleaning“-Technik (Schafer 1994, S. 208) aus. Zusammen mit seinen sogenannten „soundwalks“ (Schafer 1994, S. 212) und seinem Bestreben der Einführung des „ear-cleaning“ an Schulen (Schafer 1994, S. 4) wollte Schafer dem Trend der visuellen Fixierung entgegenwirken, um ein zukünftig besseres „Acoustic Design“ (Schafer 1994, S. 4) zu ermöglichen, das das Soundscape der Welt verbessern sollte. In diesem Sinne schlug er vor, Soundscape als eine Art weltumspannende musikalische Komposition zu betrachten, die ohne Unterbrechung um den Menschen herum fortläuft (Schafer 1994, S. 205) und auf einem Weltinstrument, das einer Stimmung benötigt, gespielt wird (Hannoschöck 2009, S. 42). Auf diesen Gedanken bezieht sich auch der Titel seiner Publikation „The soundscape - Our sonic environment and the tuning of the world“ (Schafer 1994). An einer anderen Stelle in seiner Hauptschrift definiert er Soundscape jedoch auch als jedes akustische Studienfeld (Schafer 1994, S. 7). Diese breite, im Grunde genommen alles Hörbare, was den Menschen umgibt, beinhaltende Definition ist nach der Meinung des Autors ungünstig und neben der Komplexität des Gebietes Ursache dafür, wie uneindeutig der Begriff Soundscape ist. Dennoch lässt sich bei Schafer ein eindeutiger Trend der Charakterisierung des Soundscape-Begriffs erkennen, der heute in die Richtung der „acoustic ecology“ (Schafer 1994, S. 205) eingeordnet wird. Auf deutsch Akustische Ökologie bezeichnet, befasst sie sich zwar auch mit vom Menschen generiertem Schall, diese Forschungsdisziplin legt aber einen Schwerpunkt auf den Schall, der in die geophonische und biophonische Kategorie fällt. Anthrophone Klänge, vor allem neu aufkommende, werden oft negativ bewertet (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 7). Dies erkennt man auch in der Kritik Schafers an

vielen technischen Neuerungen, die zwar verbesserungswürdig erscheinen aber durch seine Art der Beschreibung eine kategorische Ablehnung technischen Fortschritts seinerseits erahnen lassen (Schafer 1994, S. 84). Um Soundscapes beschreiben zu können, teilt Schafer Klänge in drei Kategorien ein. „Keynotes“ (Schafer 1994, S. 9) sind im Grunde genommen Hintergrundgeräusche, die ähnlich der Grundtonart einer Musikkomposition zu verstehen sind. Sie bilden die Grundatmosphäre einer Umgebung und werden eher unterbewusst wahrgenommen. Dies zeigt sich dadurch, dass diese oft erst wahrgenommen werden, wenn sie sich verändern oder verschwinden. Schafer zieht hier eine Parallele zur Figur-Grund-Wahrnehmung aus der Gestaltpsychologie, wobei keynotes dem Grund entsprechen, die das Erkennen der Umrisse einer Figur erst ermöglichen. Keynote Klänge eines Ortes sollen somit dazu beitragen, den Charakter dort lebender Menschen zu skizzieren. „Sound signals“ (Schafer 1994, S. 10) entsprechen der Figur in der Figur-Grund-Analogie. Sie sind vordergründige Geräusche, die Aufmerksamkeit auf sich ziehen sollen und bewusst wahrgenommen werden. Das Besondere ist, dass jedes Geräusch zum sound signal werden kann, wenn man diesem bewusst zuhört, da es sich somit vom keynote abhebt. Schafer beschränkt sich aber der Einfachheit halber auf Geräusche, bei denen man nicht umhinkommt, ihnen zuzuhören, wie beispielsweise Sirenen, Hörner oder Pfeifen. Wie der Name impliziert, handelt es sich hierbei oft auch um Geräusche, die wichtige Informationen transportieren, wie beispielsweise die Sirene eines Krankenwagens. Die dritte Grundkategorie sind die „soundmarks“ (Schafer 1994, S. 10), bei denen es sich um Geräusche oder Klänge handelt, die als eine Besonderheit des Ortes angesehen werden und oft auch einen kulturellen Hintergrund haben. Dies erschließt sich aus der Herkunft des Wortes einer Sehenswürdigkeit auf englisch auch „landmark“ genannt. Solche soundmarks sollen nach Schafers Ansicht genauso geschützt werden, wie physisch greifbare und visuelle Objekte, die unter Denkmalschutz stehen. Beispiele für soundmarks wären der Klang eines Wasserfalls, Geysirs oder eine historische Glocke (Wrightson 1999, S. 10–11). Nun klassifiziert Schafer zwei Grundarten von Soundscapes, die hier nur kurz aufgeführt werden sollen, da sie im Kapitel 2.4 über den Wandel der Soundscape näher behandelt werden. Ein „hi-fi soundscape“ (Schafer 1994, S. 43) unterscheidet sich demnach von einem „lo-fi soundscape“ (Schafer 1994, S. 43) vor allem durch eine gute Durchhörbarkeit, bei der einzelne Geräusche oder Klänge aufgrund eines geringen Umgebungslärmpegels wahrgenommen werden können.

Ohne die große Leistung Schafers zu schmälern - er selbst sieht sein Werk als Anfangsschritt und seine Gedanken ebenfalls als diskutabel (Schafer 1994, S. 7) - bildete sich bald Kritik, die hier genutzt werden soll um den Begriff Soundscape klarer abzugrenzen. Timothy Ingold, Professor für Sozialanthropologie an der Universität Aberdeen in Großbritannien, findet in seinem Essay "Against Soundscape" (Carlyle 2007, S. 10) klare Worte gegen das Konzept, welches Murray Schafer aus dem Boden gestampft hatte, indem er diesem nur die Relevanz zuschreibt, das Thema publik gemacht und eine zu starke Fixierung auf das Visuelle aufgezeigt zu haben. Auch wenn Ingold diese Entwicklung sehr begrüßt, sei dessen wissenschaftlicher Nutzen seiner Meinung nach damit aber aufgebraucht. Zusammenfassend kritisiert Ingold die grundsätzliche Herangehensweise Schafers, indem er dessen Konzept mit einer persönlichen Interpretation der Akustik einer realen, physischen Welt vergleicht. Er verschiebt den Fokus auf die Wahrnehmung des Hörers und darauf, was es bedeutet zu hören, anstatt die Ohren als eine Art Abspielgerät zu betrachten, das die Realität wiedergeben könnte, welche danach erst vom Hörer bewertet wird. Es sei laut Ingold somit auch nicht möglich, Eindrücke aller Sinne voneinander zu trennen, da beispielsweise die visuelle Wahrnehmung stark mit der auralen verknüpft ist. Mit seiner Aussage: "Sound, in my view, is neither mental nor material, but a phenomenon of experience - that is, of our immersion in, and commingling with, the world in which we find ourselves." (Carlyle 2007, S. 11) definiert er den Begriff Sound als etwas Subjektives, das vom Hörer erfahren, indirekt mitgestaltet und nicht steril beobachtet wird. Die bei Schafer etwas unter den Tisch fallende Subjektivität der Wahrnehmung einer akustischen Umgebung beobachtet auch der Kulturgeograf und Klangforscher Justin Winkler an Schafers Methodik, vergangene Soundscapes, von denen es keine nach heutigem Sinne systematische Aufzeichnungen schriftlicher oder akustischer Natur gibt, mittels Zeitzeugenberichten zu rekonstruieren. Er kritisiert, dass die literarischen Quellen nicht als subjektive Wahrnehmungen vergangener akustischer Umgebungen verwendet werden (Justin Winkler 2006, S. 21), sondern als objektive Beschreibungen. Aus diesen Tatsachen heraus wird nun die Abgrenzung des Begriffs Soundscape von einer wissenschaftlichen Beschreibung einer realen akustischen Umgebung durch die subjektive Qualität eines Soundscape definiert. Der Begriff Soundscape bezeichnet in dieser Arbeit also ein subjektives Wahrnehmungskonstrukt der akustischen Umgebung eines bestimmten realen Ortes (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 8). Soundscape beschreibt, wie eine Gesellschaft oder ein

Individuum ihre beziehungsweise seine Umwelt auf akustischer Ebene wahrnimmt und versteht. In anderen Worten als einen Klang, eine Mischung aus Schall, die einer immersiven Umgebung entspringt, die als Ganzes erfahren wird und deren Entstehungseinflüsse nicht nur auf die übermittelten Informationen des Hörsinns beschränkt sind (Schulte-Fortkamp und Kang 2013, S. 765). Dies erweitert auch den klassischen Weise durch die Physik geprägten Bereich der Lärmforschung durch die Einbeziehung von Sozialwissenschaften. Die genaue Kenntnis der menschlichen Wahrnehmung und sozialer Faktoren wird somit die Voraussetzung für physikalische Messungen und insbesondere deren Auswertung, konträr zu einem Ansatz, der sich nur mit Pegelminderungen aufgrund von Lärmbeschwerden befasst. Wie Schulte-Fortkamp und Kang in ihrer „Introduction to the special issue on soundscapes“ (Schulte-Fortkamp und Kang 2013, S. 765) schreiben, ist die Soundscapeforschung noch in Ihrer Etablierungsphase. Sie erlangt jedoch immer mehr Anerkennung und die Relevanz der Themen verbreitet sich weltweit, trotz der schwierigen disziplinübergreifenden Thematik und der leider noch zu geringen Zusprechung von Fördermitteln.

2.3 Wahrnehmung von akustischen Umgebungen

In diesem Kapitel soll es nicht darum gehen die menschliche Wahrnehmung vollständig zu erklären, sondern nur die Besonderheit im Zusammenhang mit Soundscapes und akustischen Umgebungen aufzuzeigen. Zu Grundlagen der Schallwahrnehmung findet sich Näheres im „Handbuch der Tonstudioteknik“ von Michael Dickreiter (Dickreiter 2014, S. 115). Hannoschök zitiert in ihrer Schrift über Soundscapes und Lärm im Absatz über die kulturelle Symbolik von Klängen den Klangforscher Georg Spehr, der viele Faktoren, die zur Entstehung einer Soundscape im Kopf des Hörers beitragen, auf den Punkt bringt.

„[Wie] jemand ein Klangereignis empfindet und deutet, ist von der Konditionierung, dem Erfahrungsschatz und Wissen abhängig, welche wiederum durch viele Aspekte wie Alter, Persönlichkeit, Bildung, Umfeld und Kultur beeinflusst werden.“ (Hannoschök 2009, S. 50)

Dies soll noch einmal verdeutlichen, wie wichtig es ist, die Sensibilität und Bedeutung eines Klanges für den Hörer zu berücksichtigen, da der persönliche Geschmack oder die Präferenz die Bewertung und somit die Wahrnehmung des Klanges beeinflussen

(Kang 2007, S. 46). Eine Person, die beispielsweise einen ruhigen Spaziergang durch einen Park unternehmen möchte, um ihre Gedanken zu sortieren, würde vermutlich nicht das Zentrum einer großen Stadt dazu wählen und die akustischen Eindrücke wahrscheinlich anders bewerten, als ein Tourist, der eben diese Stadt kennenlernen und sich in dessen Trubel stürzen will. Wichtig ist also der Kontext, in dem ein Schallereignis erfahren wird.

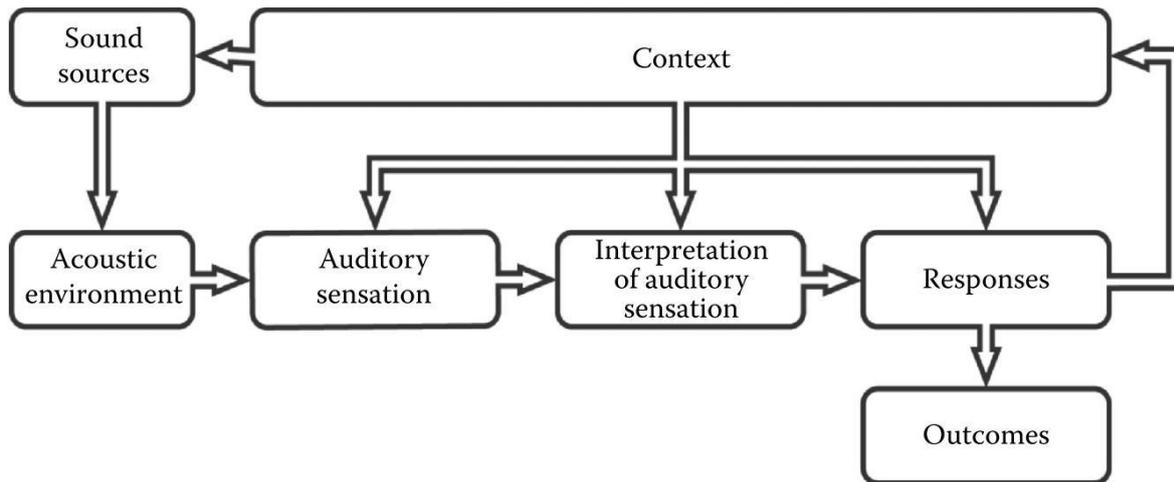


Figure 1.2 A conceptual diagram of the elements of the process by which an individual's perceptual construction of a soundscape occurs within an acoustic environment. The context (physical as well as previous knowledge and experience of the individual) in which this process occurs critically influences the perception of the soundscape, as it does the human response to it, and outcomes arising from the experience. (From ISO/FDIS 12913-1. Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and Conceptual Framework, April 2014.)

Abbildung 3: Kontext (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 6)

Abbildung 3 skizziert den Entstehungsprozess eines Soundscapes und veranschaulicht den starken Einfluss des jeweiligen Kontextes, auf den später noch genauer eingegangen wird. Interessant ist hier vor allem auch die regelkreisartige Struktur, bei der die Reaktionen („Responses“) auf eine akustische Umgebung, wie beispielsweise Aufregung, Angst oder Behagen zwar direkt zu einem Ergebnis („Outcome“) führen, wie beispielsweise Erholung, Harmoniegefühl oder Ortsverbundenheit, aber gleichzeitig auch wieder den Kontext beeinflussen, der schon die ursprüngliche Reaktion beeinflusst hat. Dies kann dann wieder zu einem neuen Ergebnis führen (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 6). Daraus lässt sich schließen, dass ein Soundscape kein starres, sondern ein sich immer veränderndes Konstrukt der Wahrnehmung durch die stetige Interaktion des Hörers mit seiner Umwelt ist. Hinzu

kommen drei mögliche Ergebnisarten, die auf eine unterschiedliche Bewusstheit des Hörers zurückzuführen sind. Erstens kann sich der Proband bewusst mit seiner akustischen Umgebung auseinandersetzen, wodurch sogenannte direkte Ergebnisse entstehen. Zweitens kann sich der Hörer unbewusst mit seiner Umgebung auseinandersetzen, was zu indirekten Ergebnissen führt. Zuletzt kann es manchmal sein, dass die Aufmerksamkeit eines Probanden erst auf einen bestimmten Aspekt gelenkt werden muss, den dieser selbständig gar nicht beurteilt oder verarbeitet hätte, was auch als „experimenter effect“ (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 7) bezeichnet wird und im Grunde initiierte Ergebnisse sind. Weiterhin gibt es Indizien dafür, dass visuelle und

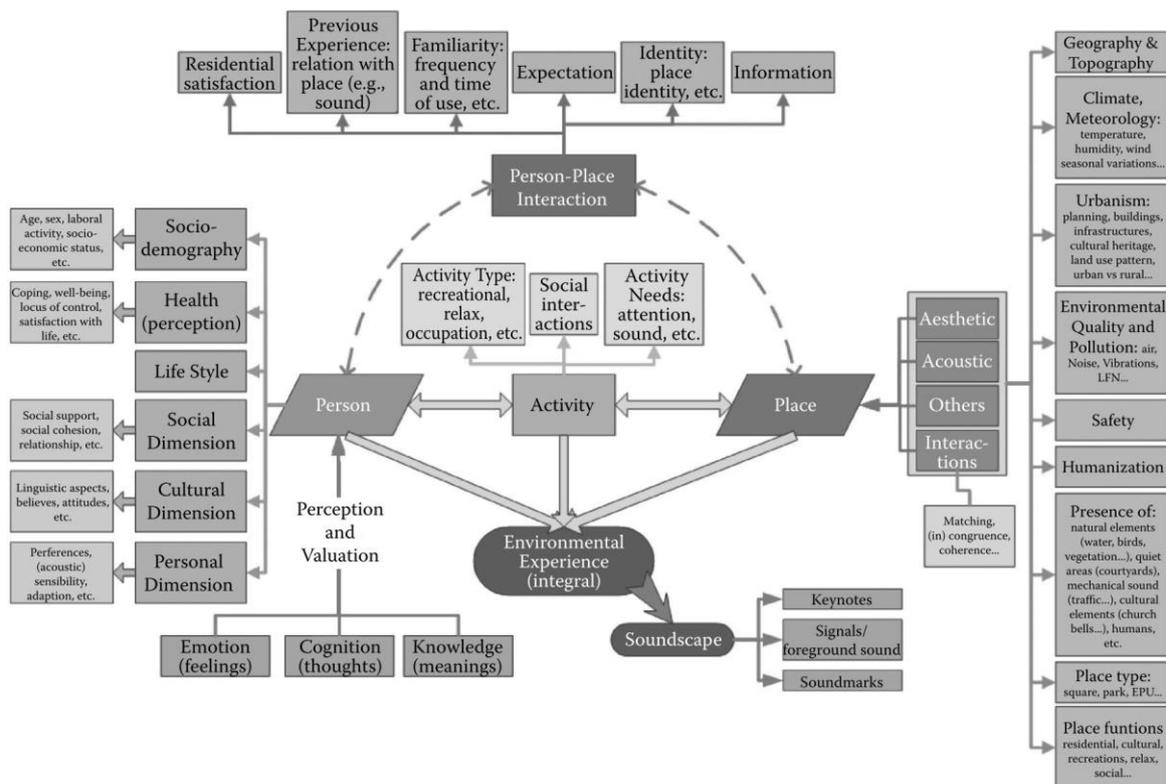


Figure 1.3 Conceptual model of various contexts of a person, place, person–place interaction, and activity relevant to that person's perceptual construction of the soundscape of that place. (From Herranz-Pascual, K., et al., Proposed conceptual model of environmental experience as framework to study the soundscape, in *Inter Noise 2010: Noise and Sustainability*, Lisbon, Portugal, 2010.)

Abbildung 4: Kontext im Detail (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 11)

akustische Eigenschaften eines Ortes direkt miteinander interagieren, wenn es um die menschliche Umweltwahrnehmung und Erfahrung geht (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 9). Betrachten wir nun aber den weiter oben genannten Kontext mittels Abbildung 4 etwas genauer. Der Kontext, der hier im Grunde genommen alle nichtakustischen Einflüsse eines Soundscape zusammenfasst, kann in vier Gruppen

eingeteilt werden (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 10). Diese sind nach Abbildung 4 Person („person“), Ort („place“), Person-Ort Interaktion („person-place interaction“) und Aktivität („activity“). Grundsätzlich ist wichtig zu verstehen, dass diese Gruppen die Wahrnehmung von akustischen Umgebungen beeinflussen können aber nicht unbedingt müssen. Jede Person an einem Ort bringt ihre einzigartigen Eigenschaften, wie Herkunft, Alter, Beruf, persönliche Vorlieben oder einen bestimmten Grund des Aufsuchens des Ortes mit sich. Dieser hängt eventuell mit einer Vielzahl an möglichen aktiven oder passiven Aktivitäten zusammen, die an diesem Ort alleine oder in einer Gruppe vom Menschen ausgeübt werden können, wodurch man ebenfalls den „Ort“ durch eine andere „Brille“ betrachtet. Selbstverständlich hat jeder Ort auch seine eigene physische Erscheinungsform, wie Bebauung, Grünanteil oder kulturelle Konnotationen, die alle oft abhängig von der Tages- oder Jahreszeit sein können. Die Person-Ort-Interaktion bezeichnet hier eher Erinnerungen oder Erwartungen von eventuell früheren Besuchen des Ortes. Auch wenn nur ein Faktor des Kontext verändert wird, könnte dies dazu führen, dass der „Ort“ zu einem bestimmten Moment in einem ganz anderen Licht betrachtet wird, was der komplexen Entstehung eines Soundscape zu Grunde liegt (Kang und Schulte-Fortkamp 2017, S. 10). Man könnte dies mit einem Gefühl für einen Ort vergleichen, den Wrightson als „sense of space“ (Wrightson 1999, S. 11) bezeichnet. Diesen beschreibt er aufgrund seiner klangökologischen Sichtweise jedoch nur als Attribut eines Hi-Fi Soundscapes. In Abbildung 4 wird auch die Verbindung zu Schafers Ansichten gezeigt, die im Grunde genommen seiner subjektiven Wahrnehmung seiner akustischen Umgebung entsprechen, die folglich als sein persönliches Soundscape betrachtet werden sollten. Aus diesem Grund können seine Begrifflichkeiten wie keynotes oder soundmarks weiterhin als subjektive Bezeichnungen zur Beschreibung des eigenen Soundscape verwendet werden. Dies führt zur Definition von Lärm, der im Grunde genommen nichts anderes als unerwünschter Schall ist, was ihn zu einer subjektiven Erscheinung macht. Da Lärm gleicher Intensität unterschiedlich stark als störend empfunden wird, weil die vielen nicht akustischen Faktoren mit einbezogen werden müssen, ist es schwer eine Lärminderung zu verwirklichen (Schulte-Fortkamp und Kang 2013, S. 765). Die World Health Organization (WHO) erkennt Lärm in ihrer Veröffentlichung „Burden of Disease from Environmental Noise“ als ein großes Problem, das vor allem im urbanen Raum auftritt und eine große Zahl an Menschen beeinträchtigt (Europe 2011, S. 1). Verkehrslärm steht laut der WHO an zweiter Stelle der Umweltstressoren

bezüglich der stärksten Auswirkung auf die öffentliche Gesundheit. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, die Wahrnehmung akustischer Umgebungen oder Soundscapes zu verstehen, um dieses Problem sinnvoll angehen zu können.

2.4 Wandel der Soundscapes

In Kapitel 2.2 wurde an der Methodik Schafers, vergangene Soundscapes zu rekonstruieren, das Übergehen der Subjektivität einer Schilderung aus literarischen Quellen oder dem Gedächtnis kritisiert. Aufgrund der erweiterten Definition eines Soundscape als etwas Subjektives, ist es nach der Meinung des Autors aber kein Problem historische Überlieferungen als Indiz dafür heranzuziehen, wie sich akustische Umgebungen über die Jahre verändert haben. Dabei ist klar, dass es sich hierbei um die Beschreibung individueller Soundscapes handelt, die nicht Allgemeingültigkeit haben und dass das Wissen, wie eine akustische Umgebung genau beschaffen war, dann nur gemutmaßt werden kann. Um die große Bedeutung und Chance für das Leben im städtischen Raum, die wir durch die aufkommende Elektrifizierung unserer Fortbewegung erhalten, zu erkennen, muss erst erkannt werden, was über Generationen verloren gegangen ist. Schafer beschreibt den Urzustand der akustischen Umgebung eines Menschen als „hi-fi soundscape“ (Schafer 1994, S. 43 ff.). Dessen Hauptmerkmal ist, dass weniger Schallverdeckungen stattfinden und sich die schon im Kapitel 2.2 der Definition von Soundscapes erwähnte Unterteilung in Figur und Grund besser erkennen lässt. Dies führt zu einer klareren Klangperspektive. Durch diesen günstigen Signal-Rauschabstand wird außerdem die umgebungsbedingte Klangfärbung deutlicher hörbar, wie auch beispielsweise Reflektionen von Wänden. Diese ist als Informationsaufladung über den Zustand und die Beschaffenheit des Ortes zu verstehen, die zu einer besseren Möglichkeit für den Hörer führt, diesen zu charakterisieren (Wrightson 1999, S. 11). Unterstützt wird dies durch einen erweiterten „acoustic horizon“ (Wrightson 1999, S. 11), der die Ausdehnung des Bereiches beschreibt, aus dem Schallquellen noch wahrgenommen werden können. Wenn entferntere und somit auch die Anzahl unterschiedlicher Schallquellen, die wahrgenommen werden können, steigt, steigt auch der Abwechslungsreichtum innerhalb einer akustischen Umgebung und der Abwechslungsreichtum der akustischen Umgebungen untereinander. Dies führt laut Wrightson dann zu Soundscapes, die den Ort auf einer persönlichen Ebene widerspiegeln können. In diesem Sinne könnten Städte beispielsweise akustische

Identitäten ausbilden, anhand derer allein man die jeweilige Stadt erkennen könnte. Weiterhin ist es nach Wrightson (1999, S. 10–11) die Ansicht von Vertretern der Forschungsrichtung der akustischen Ökologie, dass Hi-Fi Soundscapes ein Gleichgewicht in Pegel, Spektrum und Rhythmus aufweisen. Er bezieht sich hierbei unter anderem auf die „niche hypothesis“ (Krause 2008, S. 73 f.) von Bernie Krause, einem Pionier der Aufnahme natürlicher Soundscapes, Musiker und Klangforscher. Diese besagt, dass in Biomen beziehungsweise ökologischen Großlebensräumen, die als Einheit zusammengefasst werden können und eine hohe Dichte und Vielfalt von Tierlauten aufweisen, der akustische Raum zeitlich, frequenziell und räumlich unter den Lebewesen aufgeteilt ist. Diese sogenannten Nischen werden dabei von den verschiedenen Tierarten symbiotisch oder im Wettstreit miteinander genutzt, sind jedoch immer aufeinander abgestimmt. Krause vergleicht seine Beobachtung mit den Instrumenten eines Orchesters, die in einer Komposition so eingesetzt werden, dass jedes Instrument gut gehört werden kann und Maskierungseffekte reduziert werden. So können für viele Lebewesen wichtige Informationen wie Warn- oder Paarungsrufe stets übertragen werden. Diese biophonen Laute werden im Grunde genommen in die Geophonen der Umgebung eingebettet, die Krause als Klänge von Wind, Wasser, Wetter und geophysikalische Kräfte umreißt (Krause 2008, S. 75). Schafer bezeichnet dies als „The Natural Soundscape“ (Schafer 1994, S. 15) und erweitert dieses um „The Sounds of Life“ (Schafer 1994, S. 29), um alle Tiere miteinzubeziehen. Für Schafer sind aber nicht nur die geophonen und biophonen Klänge Teil eines hi-fi Soundscapes. Er bezieht die anthrophonen Klänge einer ländlichen Gegend oder eines Dorfes mit ein (Schafer 1994, S. 43). Sein Bild dieses Soundscapetyps ist ein sehr idyllisches, welches nur durch den Lärm des Krieges oder Religion – im Sinne lauter Glocken – gestört wird (Schafer 1994, S. 49). Dies änderte sich aber laut Schafer aufgrund von zwei Entwicklungen. Erstens war es die verstärkte Urbanisierung, bei der immer mehr Menschen in die Städte zogen, was zu einer erhöhten Bevölkerungsdichte führte und zweitens die industrielle Revolution, gefolgt von einer nach Schafer „Electric Revolution“ (Schafer 1994, S. 88), die im Grunde genommen den Einzug elektronischer Geräte und Entwicklungen in den Lebensalltag bezeichnet. Zur Zeit der industriellen Revolution bestand das deutsche Kaiserreich, dessen Zeitzeugin und Schriftstellerin Emmy v. Dincklage von Hannoschöck zitiert wird, um die Wahrnehmung eines neuen Hauslärms als direkte Folge der Urbanisierung um 1900 zu verdeutlichen.

„Derselbe zerfällt in Vocal-Lärm (Schreien und Singen) und den Instrumental-Lärm des Clavierspielens, Thürenschiagens und -knarrens, des Klopfens, Trampeln, Möbelstoßens usw. Manche praktische Frau zwingt der Welt die Anerkennung ihrer Verdienste durch häusliches Geklapper ab; sie würde glauben, nichts geleistet zu haben, wenn man sie nicht schaffen hörte in weitesten Schallkreisen“ (Hannoschöck 2009, S. 44).

Zu diesen Klängen aufgrund des nahen Zusammenlebens vieler Menschen kamen die Klänge des urbanen Transportwesens hinzu. Straßenbahnen, Busse und mit der Zeit immer mehr PKW's mit ihren Fahrtgeräuschen und Signalen, wie Klingeln oder Hupen. In der Anfangszeit gab es natürlich auch noch keine Verordnungen, die den Lärm begrenzten und aufgrund der Neuheit der Entwicklungen, waren viele Fahrzeuge auch nicht ausgereift genug. So wurden für Lastkraftwagen noch schwere Eisenräder verwendet, die nicht gerade leise über die Straßen rollten (Hannoschöck 2009, S. 44). Das Aufkommen von industriellem Lärm war aber der schlimmste Störfaktor in Städten, da damals auch nicht wie heute üblich in Industriegebiete und Wohngebiete getrennt wurde (Hannoschöck 2009, S. 44). Dies hat sich mit der Zeit selbstverständlich gebessert, auf den Urzustand ist es jedoch nicht zurückgegangen. Schafer beschreibt dieses neue Soundscape als Lo-Fi (Schafer 1994, S. 71). In diesem Klangteppich aus verschiedenen meist monotonen Geräuschen gehen die oben beschriebenen Eigenschaften eines Hi-Fi Soundscape verloren. Im Extremfall führt dies zur Isolation des Hörers von seiner Umgebung, was für Wrightson eine Ursache der Lärmempfindung ist (Wrightson 1999, S. 11). Ein wichtiger kritisierender Begriff Schafers ist „Schizophonia“ (Schafer 1994, S. 90). Im Zuge der Entwicklung der Tonaufzeichnungs- und Vervielfältigungstechniken wurde es möglich, die flüchtige Qualität eines Klangs festzuhalten und unabhängig von seiner Entstehung wiederzugeben. Der Neologismus Schizophonie soll diese für Schafer negative Spaltung zwischen originaler Schallerzeugung und vielfacher elektronischer Wiedergabe beschreiben. Dies führte zur Nutzung schizophoner Wiedergabegeräte als „Soundwall“ (Schafer 1994, S. 95), durch die ungewünschte Klänge, wie Verkehrslärm – der die ubiquitäre keynote der heutigen Zivilisation darstellt (Schafer 1994, S. 82) – abgewehrt und durch etwas angenehmeres ersetzt werden können. Die Folge ist ein Teufelskreis, den Wrightson als einen Lärmgenerator bezeichnet, bei dem jeder den anderen an Laustärke überbieten muss, um den Lärm entweder mit Musik

zu verdecken oder über diesen hinweg kommunizieren zu können (Wrightson 1999, S. 12 f.). Dies soll dazu führen, dass der Lärmanteil eines Soundscape pro Jahr um ungefähr 0,5 – 1 dB ansteigt. Einen allgemeinen Anstieg der Lärmbelastung in Europa bestätigt die WHO im Vergleich zu anderen Umweltstressoren (Europe 2011, S. 1). Das Verständnis des Lebens hat sich dahingehend verändert, dass anhaltender Lärm und Aktivität als normal betrachtet werden und Verkehrslärm von vielen als Tatsache des Stadtlebens hingenommen wird. Die Erforschung von Zusammenhängen zwischen Lärm und dessen gesundheitlichen Folgen für Belastete liefert jedoch immer mehr Ergebnisse.

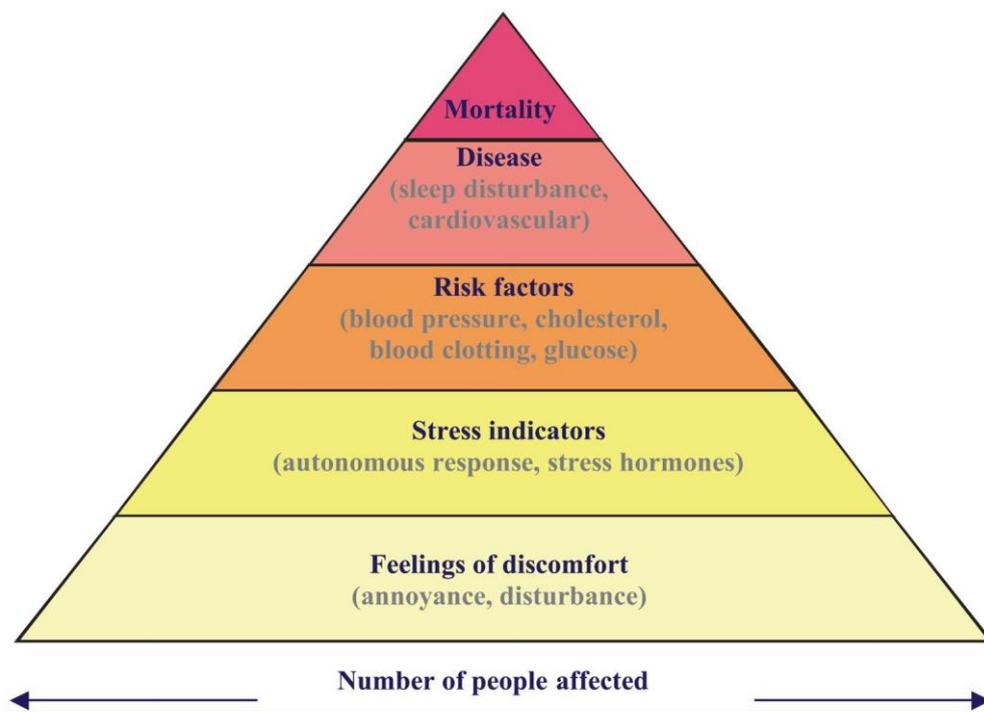


Abbildung 5: Lärm und gesundheitliche Folgen in Abhängigkeit der Zahl Betroffener. (Europe 2011, S. 100)

Abbildung 5 nennt einerseits die bekannten gesundheitlichen Folgen von Lärm und veranschaulicht andererseits, wie viele Menschen schätzungsweise von diesen Folgen verhältnismäßig betroffen sind. Zusätzlich gibt es Indizien dafür, dass Lärm die kognitiven Fähigkeiten von Kindern beeinträchtigt und eine Ursache für Tinnitus sein könnte (Europe 2011, S. 101). Vor allem in Anbetracht von Verkehrslärm als einem der hauptverantwortlichen der oben dargestellten gesundheitlichen Folgen wird deutlich, wie negativ sich das urbane Soundscape verändert hat und dass eine

Veränderung akustischer Eigenschaften der Verkehrsteilnehmer Abhilfe schaffen könnte.

3. Klang der Elektromobilität

Wie im Vorangegangenen gezeigt, spielt das Verkehrsgeräusch eine große Rolle in der Veränderung urbaner Soundscapes hin zu einem lo-fi Soundscape. Für das Soundscape einer Stadt ist dabei aber nur das Außengeräusch eines Fahrzeuges relevant. Ein so lautes Innengeräusch, wie beispielsweise lauter Musikgenuss, welches nennenswert nach außen gelangen könnte, wird hier vernachlässigt. Dieses Außengeräusch kann man in das Standgeräusch und Fahrgeräusch unterteilen (Zeller 2009, S. 267). Aus welchen Elementen das Fahrgeräusch eines Fahrzeuges mit Verbrennermotor zusammengesetzt ist, kann in Abbildung 6 betrachtet werden.



Abbildung 6: Zusammensetzung des Fahrgeräuschs. (Zeller 2009, S. 158)

Dieses Fahrgeräusch fasst alle Geräusche zusammen, die mit der Fortbewegung des Fahrzeuges zusammenhängen. Setzt man dies nun in Abhängigkeit der Geschwindigkeit wie in Abbildung 7, kann man erkennen, dass im innerstädtisch relevanten Geschwindigkeitsbereich bis 50 km/h die für ein Fahrzeug mit Verbrennermotor relevanten Elemente dominieren. Da in der Automobilindustrie der Fokus oft auf die Innenraumakustik des Fahrzeuges gelegt ist, bezieht sich Abbildung 7 auf eben diese. Da aber anderenorts oft genannt wird, dass in Bezug auf das Außengeräusch das Roll- und Windgeräusch ab ca. 30–40 km/h (Zeller 2009, S. 269) maßgeblich in den Vordergrund tritt, kann man vermuten, dass sich die Verhältnisse aus Abbildung 7 grob auch auf das Außengeräusch übertragen lassen, da hier lediglich die Körperschallübertragung (KS) über die Karosserie ins Innere des Fahrzeuges nicht relevant ist (Zeller 2009, S. 158). Übrig bleibt beim Elektrofahrzeug dann im Grunde

genommen nur das Roll- und Windgeräusch, welches erst bei höheren Geschwindigkeiten zu hören ist. Dan Norman beschreibt in seinem Artikel im Rahmen der Klangevaluation von Vorbeifahrten von Elektrofahrzeugen lediglich ein zusätzliches hohes Surren der Elektrik, welches leise und nicht immer zu hören ist (Norman 2014). Im Stand fällt aber sogar dieses Geräusch weg und ein solches Fahrzeug ist dann vollkommen lautlos.

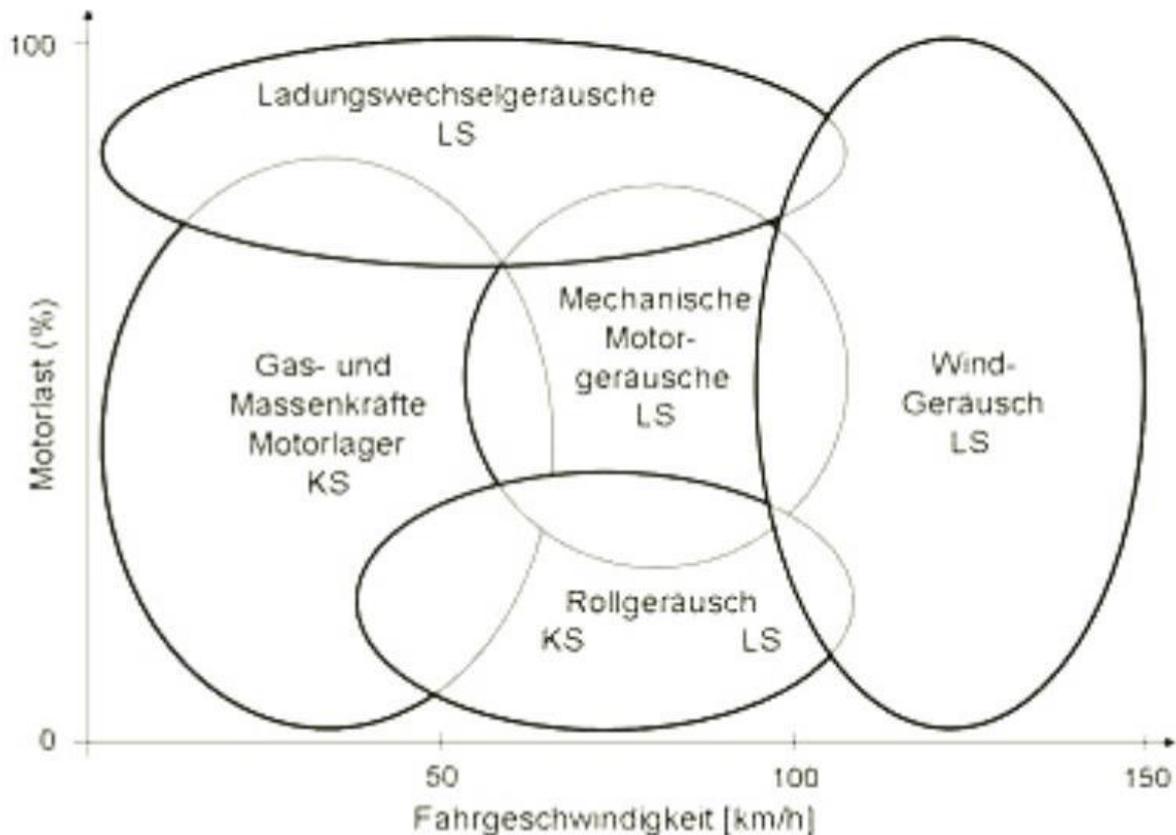


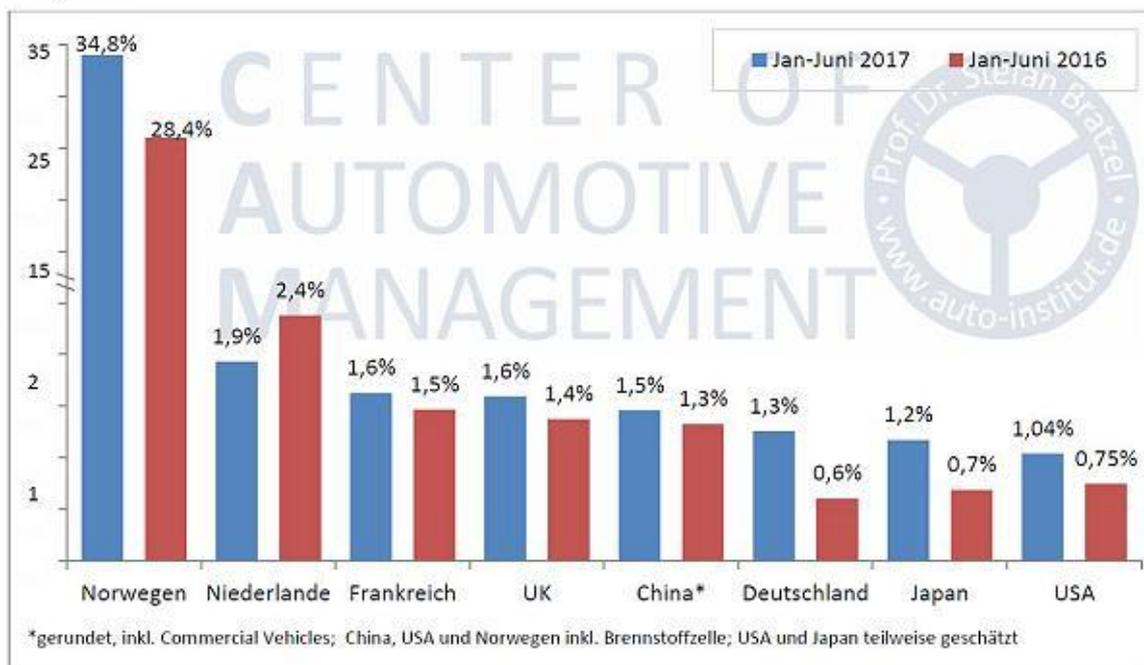
Abbildung 7: Fahrgeräuschzusammensetzung über Fahrgeschwindigkeit und Motorlast (Zeller 2009, S. 158)

Seit der Einführung von Hybridfahrzeugen im Jahr 2000 wuchs deren Anteil am öffentlichen Verkehr teilnehmender Fahrzeuge in den USA auf im Jahr 2009 0,6 Prozent an (NHTSA 2011, S. 1). 2011 veröffentlichte die National Highway Traffic Safety Administration Zahlen, die belegen, dass bei geringen Geschwindigkeiten eines Fahrzeuges die Wahrscheinlichkeit, dass ein Hybrid-Fahrzeug in einen Unfall mit Fußgängern verwickelt ist im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennermotor bis zu doppelt so hoch ist. Dabei wurden die größten Wahrscheinlichkeitsunterschiede im Geschwindigkeitsbereich unter ca. 55 km/h festgestellt. Es scheint demnach so, als hätten Fahrmanöver bei geringen Geschwindigkeiten das größte Risiko (NHTSA 2011,

S. 19–20). Dies fällt mit dem Geschwindigkeitsbereich zusammen, in dem Motor- und Mündungsgeräusche der Auspuffanlage beim Elektrofahrzeug entfallen. Dan Norman schildert die große Besorgnis von Vertretern der Blinden Bevölkerung (Norman 2014), die dieses Problem nicht durch gesteigerte Wachsamkeit im Straßenverkehr ausgleichen können. Anhand der Entwicklung der in der Abbildung 8 dargestellten Marktanteile lässt sich ein Wandel in Richtung Elektromobilität und die dadurch steigende Gefahr durch ihre Lautlosigkeit erkennen. Diese Sachverhalte haben auch die Gesetzgeber erkannt und werden in der Verordnung Nr. 540/2014 des Europäischen Parlaments und Rates behandelt, um die öffentliche Sicherheit unter Berücksichtigung des Umweltschutzes und Schaffung einer höheren Lebensqualität und Gesundheit zu gewährleisten, da Straßenfahrzeuge auch für sie eine wichtige Quelle von Verkehrslärm und Umweltverschmutzung darstellen (EU-Parlament und Rat 16.4.2014, S. 131). Dabei wird der Einbau eines „akustische[n] Fahrzeug-Warnsystem[s] (AVAS)“ (EU-Parlament und Rat 16.4.2014, S. 176) in alle neuen Typen von Hybridelektro- und reinen Elektrofahrzeugen bis spätestens 1. Juli 2019 vorgeschrieben.

Marktanteile von Elektroautos (BEV, PHEV) in wichtigen Automobilmärkten 1. HJ

2017/2016



Quelle: CAM

Abbildung 8: Marktanteile von Elektroautos (Focus Online 2017)

Dieses AVAS muss ein sogenanntes „Dauerschallzeichen“ (EU-Parlament und Rat 16.4.2014, S. 176) im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis mindestens 20 km/h und beim Rückwärtsfahren erzeugen, solange das Fahrzeug keine gesonderte akustische Rückfahrwarneinrichtung hat.

Anforderungen an den Mindestschallpegel in dB(A)

Frequenz in Hz		Prüfung mit konstanter Geschwindigkeit nach Absatz 3.3.2 (10 km/h)	Prüfung mit konstanter Geschwindigkeit nach Absatz 3.3.2 (20 km/h)	Prüfung bei Rückwärtsfahrt nach Absatz 3.3.3
Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5
Insgesamt		50	56	47
Terzbänder	160	45	50	
	200	44	49	
	250	43	48	
	315	44	49	
	400	45	50	
	500	45	50	
	630	46	51	
	800	46	51	
	1 000	46	51	
	1 250	46	51	
	1 600	44	49	
	2 000	42	47	
	2 500	39	44	
	3 150	36	41	
	4 000	34	39	
5 000	31	36		

Abbildung 9: Mindestschallpegel des AVAS (UNECE 12.01.2017, S. 39)

Wichtig ist hierbei die Kommunikation des Fahrzeugverhaltens an die Fußgänger und anderen Verkehrsteilnehmer in der Umgebung, wobei das „Geräusch [mit dem] eines

mit Verbrennungsmotor ausgestatteten Fahrzeugs der gleichen Klasse vergleichbar sein [sollte]“ (EU-Parlament und Rat 16.4.2014, S. 176) und der ungefähre Geräuschpegel eines solchen Fahrzeuges nicht überschritten werden darf. Diese recht vagen Bestimmungen wurden Anfang 2017 durch die Regelung Nr. 138 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE 12.01.2017, S. 39) erweitert. Der letztendliche Klang muss insgesamt drei Terzbänder umfassen, von denen mindestens zwei die definierten Mindestpegel im jeweiligen Band, bei der jeweiligen Geschwindigkeit aus Tabelle 9 einhalten müssen. Zusätzlich muss eines der beiden Terzbänder im 1600 Hz-Band oder darunter liegen, um auch für ältere Bevölkerungsgruppen mit eventuellen Beeinträchtigungen der Hörfähigkeit eine klare Erkennung des Fahrzeuges zu ermöglichen. Der geringste definierte Maximalpegel des Geräusches wird auf 66 dB(A) in 7,5m Entfernung festgelegt. Wie diese Pegel zu messen sind und weitere Details werden in der Regelung Nr. 138 tiefergehend erläutert (UNECE 12.01.2017). Automobilhersteller erkennen aber, wie Dan Norman bestätigt, auch ein großes Marketingpotential (Norman 2014). Ist es aber nicht ein Rückschritt, einen pragmatischen, skeuomorphischen Designansatz zu wählen, bei

Smartphone-Nutzung bei Fußgängern nach Altersgruppen



Quelle: DEKRA Unfallforschung
Verkehrsbeobachtung in Amsterdam, Berlin, Brüssel, Paris, Rom und Stockholm mit insgesamt 13.822 Fußgängern

Abbildung 10: Smartphone-Nutzung von Fußgängern (DEKRA e.V. 2016)

dem, wie Norman erklärt, neue Technologien, Alte nachahmen, ohne dass dies durch deren Funktionalität begründet ist, nur weil sie bekannt und dem Nutzer vertraut sind? Würde es nicht trotz des gesetzlichen Rahmens zu einer Kakophonie führen, wenn jeder Markenhersteller sein individuelles Design nach Außen trägt? Betrachtet man beispielsweise die Möglichkeiten der Umgebungserkennung autonomer Fahrzeuge wie beispielsweise der Firma Tesla (Tesla 2018), die eine 360°-Rundumüberwachung durch Kameras des Fahrzeuges bis zu einer Entfernung von 250m ermöglichen, welche durch Ultraschallsensoren um fast das Doppelte erweitert wird und sogar durch Hindernisse hindurchblicken kann, sollte man die Notwendigkeit eines AVAS – zumindest dessen geforderte Dauerbeschallung – hinterfragen. Hinzu kommt, dass ein signifikanter Teil der Bevölkerung, wahrscheinlich oft im Sinne einer Soundwall nach Schafer, mit Kopfhörern Musik hört oder vom Smartphone abgelenkt ist während Sie durch die Stadt geht, wie man in Abbildung 10 der DEKRA sehen kann. Diese ungefähr 10 - 23% der Fußgänger würden ein mit einem AVAS ausgestattetes Fahrzeug höchstwahrscheinlich nicht wahrnehmen. Die Zahlen des Smartphone-unabhängigen Musikhörens mit Kopfhörern im Straßenverkehr von Fußgängern und Radfahrern zeigen Ähnliches. Eine im Auftrag des Deutschen Verkehrssicherheitsrats 2015 durchgeführte Umfrage zeigte, dass „Jeder fünfte Fußgänger (22 Prozent) und fast jeder fünfte Radfahrer (19 Prozent) [...] regelmäßig oder hin und wieder mit Kopfhörern im Straßenverkehr unterwegs [ist]“ (Mit Kopfhörer unterwegs? - DVR). Es lässt sich also bezweifeln, dass mittels eines AVAS eine wirkliche Verbesserung der Sicherheit umzusetzen ist. In diesem Zusammenhang sollte es also beim Klang der Elektromobilität nicht so sehr um Sounddesign oder die Gestaltung des perfekten Klangs für Markenrepräsentation gehen, sondern um neue Wege Sicherheit, Gesundheit und Nutzerfreundlichkeit unter einen Hut zu bringen.

4. Virtual Reality- Applikation

Um die in den vorherigen Kapiteln behandelten Sachverhalte praktisch anzuwenden, eignet sich eine Virtual Reality-Applikation (VR-App), wie im Folgenden gezeigt werden soll. Im Versuchsaufbau von Hugo Fastl und Christine Patsouras, der in „Das rote Auto ist lauter!“ (Fastl und Patsouras Zugriff 2018) erläutert wird, werden multimodale Interaktionen untersucht. Wie auch in Kapitel 2.3 gezeigt, lässt sich die

menschliche Wahrnehmung laut Fastl nicht auf einen Sinn beschränken und hängt vom Kontext des Hörers ab. „An der subjektiven Bewertung von Produkten sind üblicherweise alle Sinne beteiligt“ (Fastl und Patsouras Zugriff 2018, S. 1). Wobei er als Beispiel ein Fahrzeug heranzieht. Für die Kaufentscheidung ist es neben den technischen Daten des Automobils beispielsweise wichtig, wie der Klang einer zufallenden Tür bewertet wird, ob das Lenkrad sich wertig anfühlt oder ob das Auto „neu“ riecht. Es kann auch die Lautheit eines stets gleichen Signals unterschiedlich wahrgenommen werden, wenn sich der visuelle Reiz ändert. Dies wurde untersucht, indem Testpersonen mehrere gleiche Fotos eines Zuges, welche sich nur in der Farbe unterschieden, gezeigt wurden, während man eine immer identische Tonaufnahme einer Zugvorbeifahrt vorspielte. Trotz der identischen Tonaufnahme wurde der „rote“ Zug lauter wahrgenommen als die anderen. Dass vor allem Sportwagen oft rot lackiert werden, kann also kein Zufall sein, sondern beruht auf Erfahrungswerten aus der Praxis, die mit diesem Experiment wissenschaftlich bestätigt wurden. In einer Erweiterung des Versuches wurden zur immer identischen Tonaufnahme des vorbeifahrenden Zuges „schallfremde Standbilder“ (Fastl und Patsouras Zugriff 2018, S. 2) gezeigt, beispielsweise abwechselnd das Bild eines grünen Baumes im Sommer und in kahlem Zustand im Winter. Hier war die wahrgenommene Lautstärke grundsätzlich geringer als beim passenden Bild eines Zuges, wobei die Aufnahme der Zugvorbeifahrt mit kahlem Baum als noch leiser wahrgenommen wurde als mit dem grünen Sommerbaum. Fastl vermutet, dass die persönlichen Erinnerungen der Testpersonen und deren Erfahrung, dass Schnee im Winter Schall schluckt, zusätzlich die empfundene Lautheit beeinflussen. Daraufhin wurde das Experiment mit Bewegtbildern und Bewegtbildern mit dynamischem Standpunkt, wie in einem Fahrzeugsimulator, wiederholt. Bei immer noch identischen Tonaufnahmen wurde eine fortschreitende Verstärkung des visuellen Einflusses auf die auditive Wahrnehmung festgestellt (Fastl und Patsouras Zugriff 2018, S. 3). Die hier untersuchten audio-visuellen Interaktionen wurden also bei immer realistischeren Untersuchungsbedingungen verstärkt. Da VR-Applikationen durch stereoskopische Bilder und durch Headtracking unterstützten Binauralton eine höhere Stufe der Immersion darstellen und somit eine noch natürlichere Wahrnehmung ermöglichen können, lässt sich vermuten, dass durch eine Simulation mittels VR-App eine genauere Vorhersage der Beurteilung echter akustischer Umgebungen ermöglicht wird.

4.1 Konzept

Wie man aus dem Vorhergehenden schließen kann, ist es schwer nur aus Messwerten und Datenblättern zu erahnen, wie eine Veränderung der akustischen Umgebung auf den Menschen wirken würde und was für neue Möglichkeiten oder Probleme bei der Nutzung und Erfahrung des urbanen Raums dadurch entstehen könnten. Daher soll eine Applikation entwickelt werden, die diese Veränderungen in Bezug zur aufkommenden Elektromobilität veranschaulicht. Ziel ist es, einen Blick in die Zukunft zu werfen, um herauszufinden, wie sich das Soundscape einer Stadt verändern würde, wenn Fahrzeuge mit Verbrennermotor vollständig durch Elektrofahrzeuge ersetzt würden. Dies soll im Sinne eines „Proof of Concept“ geschehen, um zu zeigen, dass dies mit den gewählten Mitteln umzusetzen ist. Diese App soll des Weiteren durch die Nutzung einer Virtual-Reality-Brille und Binauralton per Kopfhörer eine hohe Immersion bieten, die dem Zweck der Anwendung zu Grunde liegt.

4.2 Umsetzung

Jonas Stienen und Michael Vorländer sind in ihrer Publikation „Auralization of Urban Environments – Concepts towards New Applications“ (Stienen und Vorländer 2015, S. 775ff.) der Frage nachgegangen, wie man Soundscapes hörbar machen, beziehungsweise auralisieren kann. Sie betrachten neben dem schon Genannten auch einen neuen Aspekt der Thematik, da sie die erhöhte Lärmbelastung der Bevölkerung als Ursache der wachsenden Zahl an Gegnern von Großbauprojekten sehen und die Möglichkeit erkennen, durch eine bessere Planung durch die Projektleiter und intuitivere Informierung von Bürgern die Ursache für den Unmut teilweise zu beheben, was die Durchführung von Projekten, wie eine Flughafenerweiterung, erleichtern würde. Dies könnte man ihrer Meinung nach mit einer Computersimulation als Werkzeug zum Vorhersagen von akustischen Umgebungen unter Berücksichtigung der menschlichen Wahrnehmung erreichen. Als Methode zur akustischen Simulation empfehlen sie die weit verbreitete geometrische Akustik und sprechen sich für eine binaurale Wiedergabeform aus, da diese am natürlichsten sei. Da eine exakte Echtzeit-Simulation einer akustischen Umgebung sehr hohe Rechenleistung benötigt, vor allem, wenn man eine ganze Stadt betrachtet, muss vereinfacht werden. Stienen und Vorländer (2015, S. 778) stimmen dem zu, vor allem im Zusammenhang von Virtual Reality Anwendungen, da theoretisch die ganze

Verarbeitungskette bei einer hohen Bildwiederholrate und bei jeder noch so kleinen Kopfdrehung durchlaufen werden müsste, um der menschlichen Wahrnehmung gerecht zu werden und damit keine Fehler auftreten, die den Nutzer aus der Immersion herauswerfen. Dies beinhaltet beispielsweise Bewegungserkennung des Nutzers, Berechnung und Wiedergabe einer Vielzahl von grafischen Modellen, Berechnung deren Positionen und Zustände, die in die Audiosignalverarbeitung einfließen, für die neben den ganzen Klangbearbeitungen letztendlich eine neue Außenohrübertragungsfunktion, auch „Head Related Transfer Function“ (Friesecke 2014, S. 112) (HRTF) berechnet werden müsste, um dann über einen Kopfhörer dem Hörer das Gefühl zu geben tatsächlich vor Ort zu sein. Eine weitere Schwierigkeit stellt die große Anzahl sich über die Zeit verändernder Schallquellen dar, die in der Realität zu einem Geräuschteppich werden, der die keynote einer Umgebung ausmacht. In einer realen Stadt bewegen sich sehr viele Objekte – wie unter anderem Fahrzeuge, die fließend verschiedenste Zustände einnehmen, wie zum Beispiel beim Beschleunigen, Abbremsen und Stehenbleiben, bei denen sie jeweils anders klingen. Aus diesen Gründen bietet es sich an, eine VR-App zu gestalten, die ähnlich eines 3D-Computerspiels ein Stadtviertel vereinfacht simuliert. Hierbei soll mittels Knopfdruck eins von drei akustischen Szenarien angewählt werden können, wobei der visuelle Teil unverändert bleibt. Das erste Szenario soll die akustische Umgebung eines Stadtviertels darstellen, das man aus dem Alltag kennt, in dem nur durchschnittliche Autos mit Verbrennermotor umherfahren. Das zweite Szenario soll die akustische Umgebung eines Stadtviertels darstellen, in dem nur noch Autos mit geräuschlosem Elektroantrieb umherfahren, und das dritte Szenario ist eines, bei dem die Elektrofahrzeuge ein Sounddesign zu Sicherheitszwecken, wie ab Juli 2019 gefordert, ausstrahlen.

4.2.1 Erstellung eines Stadtviertels in Unity

Unity ist eine sogenannte „Game Engine“, die mit dem Unity Editor eine Entwicklungsumgebung darstellt, mit deren Hilfe Spiele oder andere Applikationen für elektronische Endgeräte wie Computer, Smartphones oder Spielekonsolen produziert werden können (Radicke SS 2017). Einige Entwicklerstudios mit erfolgreichen Spieletiteln erstellen dabei ihre eigene Game Engine oder erweitern mit einigem Aufwand eine bereits vorhandene, damit diese an die individuellen Anforderungen des zu entwickelnden Spieles optimal angepasst ist. So eine Engine vereinfacht dabei die

Erstellung eines Spieles immens, da in ihr wichtiger, grundlegender Programmcode, der oft auch wiederverwendet wird, enthalten ist. Dieser Programmcode äußert sich auch in Werkzeugen, mit deren Hilfe in einem 2D- oder 3D-Koordinatensystem eine Spielwelt gebaut werden kann. Dabei hat diese viele Ähnlichkeiten mit einer 3D-Grafiksoftware – nur, dass in Unity keine Grafikmodelle erstellt werden, sondern eher miteinander kombiniert und mit interaktiver Funktionalität versehen werden, wie man sie aus Computerspielen kennt. Der Aufbau von Unity und deren „GameObjects“ (Unity Technologies 2017b), die als Behälter für jegliches diskrete Element innerhalb der Spielwelt zu verstehen sind, erinnert mit den Eltern-Kind-Beziehungen, in die man GameObjects setzen kann, an objektorientierte Programmierung. Dementsprechend werden durch die objektorientierte Programmiersprache C# oder wahlweise auch Javascript innerhalb von sogenannten Scripts, die im Grunde einer Textdatei mit Programmcode entsprechen, GameObjects mit Funktionalität versehen, die praktisch per Drag and Drop als sogenannte „Components“ auf diese gelegt werden können. Es gibt verschiedene Arten von Components. In der Form eines Scriptes sind diese frei durch Programmcode gestaltbar, die anderen sind vorgefertigte Components, da sie sehr häufig benötigt werden – wie beispielsweise das „Transform Component“. Dieses gibt mittels drei dreidimensionaler Vektoren die genaue Position, Rotation und Skalierung eines GameObjects im Koordinatensystem der Spielwelt an. Um den Aufwand bei der Erstellung eines Stadtviertels gering zu halten, wird hier darauf verzichtet jedes 3D-Modell selber in einer 3D-Grafiksoftware zu modellieren, sondern es wird auf sogenannte kostenfreie Assets – im Grunde genommen Dateien verschiedenen Typs, die im Unity Editor genutzt werden können – aus dem Unity-Assetstore zurückgegriffen. Der Assetstore ist eine Art Onlineshop von Unity, in dem fertige Assets – die Scripts, größere Programmteile wie Plugins oder auch Prefabs sein können – gekauft oder kostenfrei heruntergeladen und genutzt werden können. Prefabs sind ein Assettyp, in dem „fertige“, komplexere GameObjects, die beispielsweise mit einer Textur, einem Grafikmodell und eventuell Scripts versehen sind, gespeichert werden können. Ein Beispiel hierfür wäre ein Auto, das eine Kombination aus verschiedenen Grafikmodellen, Texturen und Funktionen, wie beispielsweise der Möglichkeit sich fortzubewegen, besteht. Ein Prefab ist praktisch gesehen ein Platzhalter wie ein GameObject – nur, dass alle Prefabs des gleichen Typs miteinander verbunden sind und Veränderungen eines Prefabs des vom Benutzer definierten Typ Auto auf alle anderen Prefabs vom Typ Auto übertragen

werden können. In der hier entwickelten VR-App wurden viele GameObjects als kostenlos nutzbare Prefabs aus dem Assetstore heruntergeladen und an die Anforderungen angepasst. Dabei wurde aufgrund des Prototypcharakters darauf geachtet, dass alle Prefabs einen simplen optischen Stil als Weißmodell aufweisen, der aber zusammenpasst, um visuelle Irritationen zu vermeiden, welche vom Hörbaren ablenken könnten. In folgender Abbildung sieht man den fertigen Aufbau des Stadtviertels.

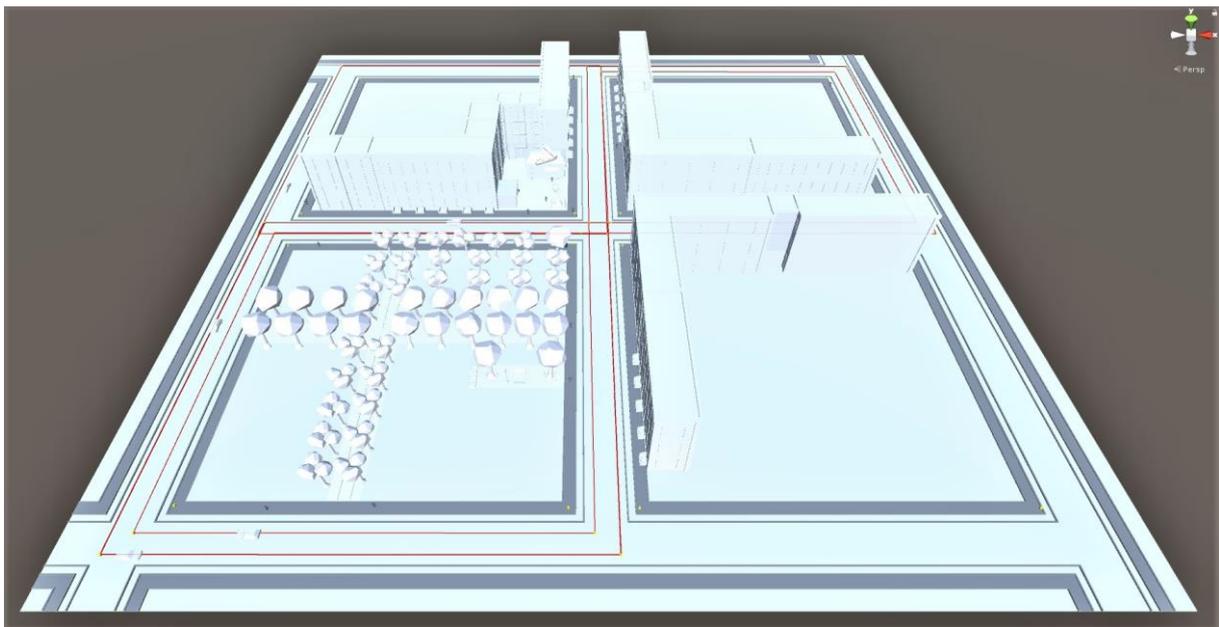


Abbildung 11: Unity Editor; Stadtviertel von oben. (Eigene Darstellung)

Um eine große Vielfalt der fertigen akustischen Umgebung zu bieten, besteht das Stadtviertel mittig aus einer Straßenkreuzung, die das Viertel wiederum nochmal in vier Quadranten aufteilt und somit verschiedenste Vorbeifahrten der animierten Automodelle ermöglicht. Um viele typische Orte einer Stadt skizzenhaft in das Viertel zu integrieren, wurde eine Parksituation, eine Straßencafé- beziehungsweise Einkaufsstraßensituation und eine durchschnittliche Wohngebietssituation geschaffen. Dies ermöglicht es, den Effekt eines Wechsels von einem akustischen Szenario zum nächsten an Orten mit unterschiedlichen Eigenschaften zu erfahren. Da das Stadtviertel mit einer VR-Brille erkundet werden soll, musste – um den gewünschten Realismus zu erreichen – darauf geachtet werden, dass die Größenverhältnisse aller GameObjects zueinander passen. Dafür wurden die einzelnen Ausmaße, soweit es ging, maßstabgetreu gesetzt. Eine virtuelle Welt lässt sich in statische oder unbewegliche Elemente wie Straßen, Gehwege und Häuser oder dynamische

Elemente wie hier den Spieler, fahrende Autos, herumgehende Personen und sich verändernde Schallquellen einteilen (Radicke SS 2017). Ein dynamisches Element kann man der Einfachheit halber in die drei Kategorien der visuellen Elemente, der funktionalen Elemente und der Audioelemente unterteilen. Letztere werden im Kapitel 4.2.3 „Audio Implementation“ genauer beschrieben. Die visuellen Elemente haben – wie der Name vermuten lässt – hauptsächlich die Funktion, dass ein GameObject für den Spieler sichtbar ist und sollen im weiteren Verlauf Models genannt werden. Diese bestehen aus weiteren Untereinheiten oder „Components“, auf die hier jedoch nicht genauer eingegangen werden soll, welche sich aber im Unity Handbuch (Unity Technologies 2017b) nachlesen lassen. Wichtig zu wissen ist, dass Models das Aussehen von Form bis Farbe beziehungsweise Textur von GameObjects definieren. Für die Fahrzeuge wurden, wie in der folgenden Abbildung zu sehen, zwei simple, weiße Models gewählt, die aus einem Fahrzeugrumpf und jeweils vier Rädern bestehen. Auf weitere Fahrzeugklassen und detailliertere Models wurde aus Effizienzgründen verzichtet.

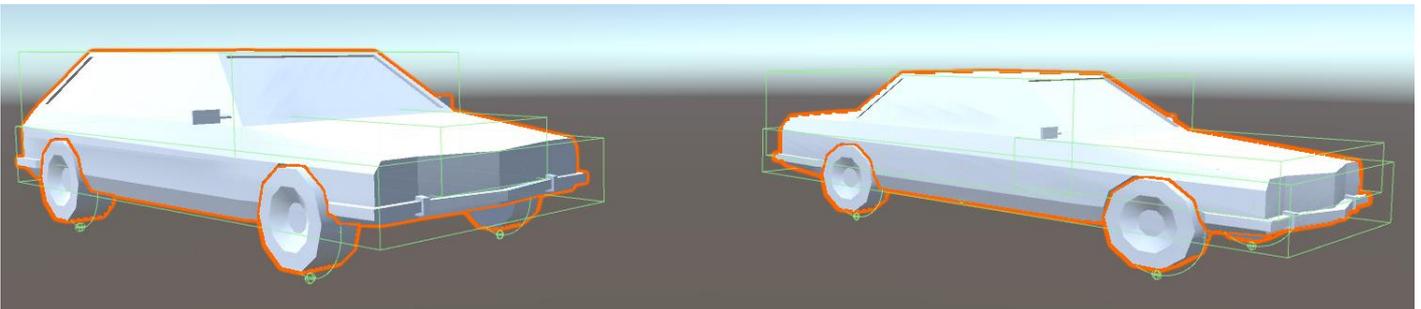


Abbildung 12: Unity Editor; Fahrzeuge. (Eigene Darstellung)

Die funktionellen Elemente kann man in der Abbildung als grüne Kästen und Kreise, allgemein „Collider“ genannt, erkennen. Sie zählen ebenfalls zu den Components und sind jeweils auf ein eigenes GameObject gelegt. Die grüne Visualisierung der Collider ist später für den Spieler nicht mehr sichtbar und dient nur der einfacheren Einstellung des Fahrzeugverhaltens, indem sie die visuellen Models mit Formen, die zur physikalischen Berechnung von Kollisionen benutzt werden, verknüpfen. Sie geben dem Fahrzeug im Grunde genommen die physische Begrenzung seiner Form, die aus Effizienzgründen nicht exakt mit den Models übereinstimmen muss. Solche Kollisionsberechnungen können über Scripts mit weiteren Funktionen verknüpft werden – wie beispielsweise einer visuellen Schadenssimulation der Models – verhindern hier vor allem aber, dass sich Models ineinander verschieben, da ein

Fahrzeug in der Realität auch nicht ohne Weiteres durch eine Wand fahren kann oder durch den Untergrund hindurchfällt. Die rechteckigen Kästen sind sogenannte „Box Collider“ und beschreiben hier die Begrenzung der Fahrzeugkarosserie. Die Häuser der App werden ebenfalls durch Box Collider approximiert, wobei es auch die ressourceteurere Variante der Mesh Collider gibt, die die genaue Form der Models annehmen, was in der App bei Bäumen im Parkviertel genutzt wird. Eine Sonderform der Collider sind die Wheel Collider, die in der Abbildung als grüne Kreise an den Rädern der Fahrzeuge zu erkennen sind. Diese sind maßgeblich an der Fahrzeugsimulation beteiligt, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen wird. Um eine möglichst realistische Fahrzeugsimulation zu erhalten, muss bei der Ausrichtung der Collider darauf geachtet werden, dass diese passend – im Falle eines Fahrzeuges symmetrisch – an die Models angebracht werden. Auf die zeitaufwändige Einstellung der 19 Parameter der Wheel Collider, wie Reibung oder Aufhängung, und deren Optimierung durch mehrfache Versuche soll hier nicht weiter eingegangen werden, da dies den Rahmen sprengen würde. Die einzelnen Teile in Form von separaten GameObjects eines dynamischen Elements werden in einem übergeordneten GameObject zusammengefasst. Auf dieses Eltern-GameObject werden dann die Skripte oder andere Components gelegt. Diese Hierarchie soll in Abbildung 13 aus dem Unity Editor veranschaulicht werden.



Abbildung 13: Unity Editor; GameObject Hierarchie. (Eigene Darstellung)

„KombiPrfb“ ist hierbei das Eltern-GameObject, wobei alle darunter stehenden GameObjects dessen „Kinder“ sind. KombiPrfb fasst hier ein Fahrzeug GameObject zusammen und wurde als Prefab gespeichert. Für eine detailliertere Erklärung des Zusammenspiels der GameObjects und Belegung mit Components muss hier wieder auf das Handbuch des Unity Editors verwiesen werden. Analog zu den Fahrzeugen sind im Grunde genommen auch die anderen diskreten, dynamischen Elemente wie die Passanten oder der Spieler aufgebaut. Die Besonderheit beim Spieler ist jedoch, dass in ihm ein „Camera“-Component in der Höhe von circa 1,7 Unity Einheiten (\cong Meter) angebracht ist, die das Bild für die VR-Brille aufzeichnet. Die Höhe ergibt sich aus Erfahrungswerten anderer VR-Apps und eigenen Tests. In den Standardassets, die von Unity Technologies kostenfrei zur Verfügung gestellt werden, finden sich verschiedene Scripts, die in dieser VR-App benutzt und angepasst wurden, da eine eigenhändige Programmierung gewisser Funktionen zu aufwändig und unnötig gewesen wäre, die im nächsten Kapitel zusammenfassend erläutert werden. Dazu gehört beispielsweise die Spielerfunktionalität, die die Navigation durch Tastatur und Maus, wie sie standardmäßig aus FPS-Spielen (First-Person-Shootern) bekannt ist, ermöglicht.

4.2.2 Programmierung und Skripte

In folgendem Kapitel werden grundlegende Begriffe der Informatik verwendet und die Programmierung der VR-App durch Scripts zusammenfassend beschrieben. Für tiefer gehende Erläuterungen wird deshalb auf folgende Quellen verwiesen (Unity Technologies 2017b) (Unity Technologies 2017a) (Fischer und Hofer 2011). Um Scripts zu bearbeiten, wurde als integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) die kostenlose Version von Microsoft Visual Studio genutzt. Unity hat selbstverständlich ein „application programming interface“ (API) mit nützlichen Klassen und Methoden, die genutzt werden können, um eigenen Code zu schreiben. Zwei Standard Methoden, die vor allem bei Echtzeitsimulationen beziehungsweise „soft real-time interactive agent-based computer simulations“ (Radicke SS 2017), denen Computerspiele entsprechen, wichtig sind, sind die Methoden „void Start()“ und „void Update()“. Erstere führt den in ihr enthaltenen Code einmalig bei Spielstart aus, was für Initialisierungen sinnvoll ist, und letztere wird einmal pro berechnetem Frame ausgeführt. Dies ist beispielsweise für Fahrzeugfunktionen wie die Vorwärtsbewegung sinnvoll. Da die Kraft, die auf einen Körper wirkt um ihn fortzubewegen unabhängig von der

Berechnungsdauer eines Frames angewendet werden sollte, weil es sonst zu unnatürlichen Sprüngen in der Fortbewegung des Fahrzeuges kommen könnte wenn die Framerate schwankt, wird dies durch die Nutzung der Methode „void fixedUpdate()“, die Framerate unabhängig und periodisch aufgerufen wird, erreicht. Das realistische Verhalten eines Fahrzeuges zu simulieren, erfordert einiges an Programmieraufwand und beschäftigt in der Entwicklung von Rennsimulatoren ganze Teams. Da die Fahrzeugbewegung hinzukommend in der VR-App nicht von einem Spieler gesteuert wird, muss eine künstliche Intelligenz (eng. artificial intelligence (AI)) genutzt werden, die eine menschliche Bedienung des Fahrzeuges nachahmt. Aus diesen Gründen wurde als Basis der Fahrzeugprogrammierung das CarController Script, das CarAIControl Script, das WaypointCircuit und WaypointProgressTracker Script aus den Unity Standardassets verwendet. Im CarController Script werden die Wheel Collider eines Fahrzeugs referenziert und mit den Models der jeweiligen Räder verknüpft, damit diese die Radbewegungen visuell darstellen. Dieses Script verleiht dem Fahrzeug all seine Funktionen und Eigenschaften wie Vorwärts- und Rückwärtsfahren, Lenken, maximales Drehmoment, maximale Geschwindigkeit, Bremsen, maximale Bremskraft und einige mehr. Da es sich um eine innerstädtische Simulation handelt, wurden alle Fahrzeugeigenschaften dementsprechend angepasst. So wurde als maximale Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h festgelegt. Dies entspricht auch dem relevanten Geschwindigkeitsbereich des hier untersuchten Themas, wie weiter oben gezeigt wurde. Eine Schwierigkeit im Entwicklungsprozess war, dass die Fahrzeugräder anfangs noch durchdrehten. Dies lag an einem eigenen Scriptentwurf, der zu wenig Details wie eine Traktionskontrolle berücksichtigte, weshalb letztendlich auf die Scripts aus den Standardassets zurückgegriffen wurde. Erweitert wurde der schon vorhandene Programmcode um Variablen, die für die Echtzeit-Vertonung durch FMOD Studio genutzt werden könnten, die in folgender Abbildung zu sehen sind.

```
[Header("LiveCarData")]  
  
public float momentarySpeed;           //zeigt momentane Geschwindigkeit  
public float gas;                       //wie stark wird aufs "Gaspedal" gedrückt  
public float bremsen;                   //wird gebremst?  
public float rPM;                       //simuliert Drehzahl mit Gangschaltung  
public int momentaryGear;               // momentan eingelegter Gang
```

Abbildung 14: Microsoft Visual Studio; Auszug aus Programmcode des CarController Scripts. (Eigene Darstellung)

Diese wurden zusätzlich noch im Unity-Editor visualisiert, damit schnell erkannt werden kann, ob sich die Werte ungünstig verhalten. Wenn sich die Geschwindigkeit beispielsweise zu schnell verändert oder sogar springt, würde man diese Variable nicht für die Vertonung nutzen können. Wichtig zu erwähnen ist hier noch, dass der für den

```

1  using System.Collections;
2      using System.Collections.Generic;
3      using UnityEngine;
4      using FMODUnity;
5
6  public class Atmocubeswitch : MonoBehaviour {
7
8
9      private FMODUnity.StudioEventEmitter eventEmitterRef;
10     public float parameter;
11
12
13
14
15
16     void Start () {
17         eventEmitterRef = GetComponent<FMODUnity.StudioEventEmitter>();
18     }
19
20
21
22     void Update()
23     {
24         if (Input.GetKeyDown("g"))
25         {
26             eventEmitterRef.SetParameter("Atmoswitch", 0f);
27             parameter = 0;
28         }
29         if (Input.GetKeyDown("h"))
30         {
31             eventEmitterRef.SetParameter("Atmoswitch", 1f);
32             parameter = 1;
33         }
34         if (Input.GetKeyDown("j"))
35         {
36             eventEmitterRef.SetParameter("Atmoswitch", 2f);
37             parameter = 2;
38         }
39     }
40
41
42
43
44
45
46

```

Abbildung 15: Microsoft Visual Studio; Programmcode des Atmocubeswitch Script. (Eigene Darstellung)

Klang von Fahrzeugen mit Verbrennermotoren aus Szenario 1 wichtige Schaltvorgang und die Drehzahl nur für die Tonverarbeitung simuliert werden, da dies für die Berechnung der Fahrzeugbewegung nicht notwendig ist. Diese Berechnung wird in der Variable public float rPM ausgegeben. Diese hat einen Wertebereich von 0 bis 1

und wird bei steigender Drehzahl größer. Wird ein Gang gewechselt, fällt der Wert der Variable um einen definierten Teil wieder ab, um die nach einem Gangwechsel oft niedrigere Drehzahl eines echten Fahrzeugs nachzuahmen. Die AI, die das Fahrzeug selbständig steuert, ist im CarAIControl Script definiert. Durch 15 verschiedene Variablen lässt sich das Fahrverhalten der AI einstellen, die einer durch Wegmarken definierten Strecke folgt. Diese Strecke wird durch das WaypointCircuit Script definiert und durch das WaypointProgressTracker Script des Fahrzeuges verwaltet, in dem ebenfalls Einstellungen vorgenommen werden, die das Fahrverhalten beeinflussen. Zusammenfassend kann man sagen, dass die AI einer gewählten Reihenfolge der ihr zugewiesenen Wegmarken folgt. Alle Fahrzeugscrippte sind an reale physikalische Gegebenheiten angelehnt, aber auch hier erfordert es viel herumexperimentieren bis das gewünschte und möglichst realistische Verhalten eingestellt ist. Die Ursache der Schwierigkeit und des hohen benötigten Zeitaufwandes dieses Prozesses ist in der Vielzahl voneinander abhängiger Variablen und der spärlichen, sich hauptsächlich auf Kommentare im Programmcode beschränkenden, offiziellen Erklärung der Scripte durch Unity Technologies begründet. Die Bewegung der Passanten erfolgt auf eine ähnliche Weise mittels Wegmarken und basiert auf dem Unity Standardasset Prefab AIThirdPersonController. Die wichtigsten Unterschiede zu den Fahrzeugen bestehen darin, dass der eigentlich komplexe Gehvorgang durch eine Animationsschleife erfolgt und dass mittels eines „NavMesh“ definiert werden muss, welche Oberflächen begehbar sind. Damit per Tastendruck zwischen den verschiedenen akustischen Szenarien gewechselt werden kann, muss auf jedes Audio GameObject, die man als Schallquellen verstehen kann, das AtmoCubeSwitch Script gelegt werden, dessen Programmcode in Abbildung 15 zu sehen ist. Zusammenfassend erklärt wird durch die Tasten auf der Tastatur g, h und j eine Variable in FMOD Studio verändert, die letztendlich durch dortige Veränderung anderer Parameter eine Umschaltung der Szenarien 1 bis 3 bewerkstelligt.

4.2.3 Audio Implementation

Die Bearbeitung und Einbindung der Tondateien erfolgte mittels Pro Tools von Avid Technology Inc. (Avid Technology 2015) und FMOD Studio von Firelight Technologies Pty Ltd. (Firelight Technologies Pty Ltd. 2018), dem FMOD Studio Plugin für Unity und dem Steam Audio Plugin für FMOD und Unity von der Valve Corporation (Valve Corporation 2018) und letztendlich dem Unity Editor (Unity Technologies 2017b)

selbst. Nähere Erklärungen der Software lassen sich in den genannten Quellen finden, da hier nur zum unmittelbaren Verständnis der VR-App notwendige Erläuterungen erbracht werden. Am Anfang der Tonproduktion stand die Auswahl für den jeweiligen Zweck geeigneter Tonaufnahmen aus Tondateibibliotheken beziehungsweise Soundlibraries. Für die ubiquitären keynote sounds wurden Windatmosphären und Stadtatmosphären mit entferntem Verkehrsgeräusch gewählt. Das Parkviertel erweitert die keynote sounds um heimische Vogellaute und Blätterrascheln des Windes aus den Baumkronen. Im Bereich der Einkaufsstraße wurden passende anthrophone Atmosphären aus Cafés oder Einkaufsläden gewählt. Die Schritte der Passanten bestehen aus Aufnahmen von Schritten auf Betonboden mit Freizeitschuhen und diversem Kleiderrascheln. Die etwas komplexeren Fahrzeugklänge bestehen aus Aufnahmen von Fahrzeugmotoren und Auspuffgeräuschen bei verschiedenen Drehzahlen, kombiniert mit Reifenabroll- und Fahrtwindgeräuschen. Im Falle der klingenden Elektrofahrzeuge wurden durch Synthesizer erzeugte Grundklänge ausgewählt, die sich am Klang futuristischer Interpretationen von Fahrzeugen aus Filmen orientieren. Die ausgewählten Tondateien wurden zunächst durch die Nutzung von Equalizern (EQs) weiter an die Anforderungen angepasst. War eine Windaufnahme zu präsent, wurden beispielsweise mit einem Schelf-Filter (Dickreiter 2014, S. 395) die Höhen reduziert oder ungewünschter Störschall, der sich häufig im Frequenzbereich unter 70Hz befindet, beispielsweise mit einem Hochpassfilter entfernt. Vor allem bei den Fahrzeugklängen mussten die Aufnahmen, die zu einem Fahrzeug gehören sollen, durch EQs einander angenähert werden, damit ein homogenes Ergebnis entsteht. Teilweise waren auch kurze, perkussive Störgeräusche in Aufnahmen bei bestimmten Drehzahlen zu hören, die durch digitale Restaurationstools entfernt wurden, die mittels einer schnellen Fouriertransformation (FFT) (Friesecke 2014, S. 20) eine gezieltere spektrale Entfernung von kurzzeitigen Störgeräuschen ermöglichen. Anschließend wurde die mittlere Lautstärke aller ähnlichen Tonaufnahmen auf ein gleiches Niveau angehoben, da im späteren Verarbeitungsprozess eine Pegelerhöhung über 12 dB softwarebedingt nur schwer möglich ist und die Mischung der Einzelklänge erst später in einer Testvorschau des Spiels innerhalb des Unity Editors vorgenommen wird. Da die meisten Schallquellen einer Stadt keine definierte Abspieldauer haben und eigentlich immer irgendetwas zu hören ist, muss mit geschickt gestalteten Schleifen oder Loops gearbeitet werden. Vor allem da nicht unendlich viel Speicherplatz

vorhanden ist, aber auch nicht das Gefühl von unnatürlicher Repetition aufkommen darf. Spielt man eine Tondatei in einer Dauerschleife ohne weitere Bearbeitung ab, entstehen Störgeräusche. Diese entstehen bei Schleifen, da auf Sampleebene (Dickreiter 2014, S. 663) der Pegelunterschied bei einem intakten, nicht verzerrten Signal von einem zum nächsten Sample nicht sehr groß, beziehungsweise der Übergang gewissermaßen fließend ist. Entsteht durch einen Schnitt beziehungsweise beim Editieren ein plötzlicher Abfall oder ein plötzlicher Sprung auf Sampleebene, wird dieser als „Knackser“ hörbar. Man könnte auch sagen, dass der Klangeinsatz der Tondatei in so kurzer Zeit stattfindet, dass die geräuschhaften Komponenten so groß werden, dass man ihn als Knack wahrnimmt (Dickreiter 2014, S. 75). Da man bei einem Loop das Ende einer Tondatei gewissermaßen auf den Anfang schneidet, passiert genau dies. Möchte man nun beim Wiedergeben einer Dauerschleife einer Tondatei einen unhörbaren Übergang zwischen Ende und Anfang erhalten, muss man das Ende der Datei in den Anfang überblenden, die Blende in die Datei hineinrechnen und genau in der Mitte der ehemaligen Kreuzblende einen Schnitt setzen. Wichtig hierbei ist, dass die Blende so gewählt werden muss, dass man diese nicht hört, wozu es kein Patentrezept gibt und somit ausprobiert werden muss. Nach dem Ausspielen hört man bei korrekter Durchführung beim einfachen Abspielen der Datei in einer Dauerschleife den Übergang nicht mehr. Zu beachten sind hierbei auch die Länge der Tondatei und periodische Klangmuster. Nach der Erfahrung des Autors können, je länger eine Datei ist, umso stärkere periodische Klangmuster enthalten sein, ohne dass einem bewusst wird, dass es sich um eine Schleife handelt. Ist die Datei beispielsweise nur zehn Sekunden lang, dürfen keine hörbaren Muster vorhanden sein. Diese Methode wird nun auf alle ausgesuchten Tondateien angewandt, was die technische und ästhetische Klangbearbeitung in einer Digital Audio Workstation (DAW) (Dickreiter 2014, S. 1400), hier Pro Tools, beendet. Nun folgt die Einbindung der Tondateien in die Middleware FMOD Studio in sogenannte Events (Firelight Technologies Pty Ltd. 2018). Diese sind logische Klangeinheiten, die im Unity Editor und am Ende im Spiel als Instanz aufgerufen, abgespielt, kontrolliert und beendet werden können. Sie werden im FMOD Studio Event Editor mit Tondateien befüllt und mit Bearbeitungen versehen, die durch gewählte Variablen aus dem Spiel kontrolliert werden können. Diese eingestellten Logiken, die die Tondateien verändern, werden durch das Ausspielen oder „build“ gespeichert, um später in den Programmcode des letztendlichen Spiels integriert zu werden. In folgender Abbildung sieht man den

Spieler (in Grün) und eine Anordnung von acht Schallquellen um ihn herum, die die Grundatmosphäre des jeweiligen Szenarios wiedergibt.

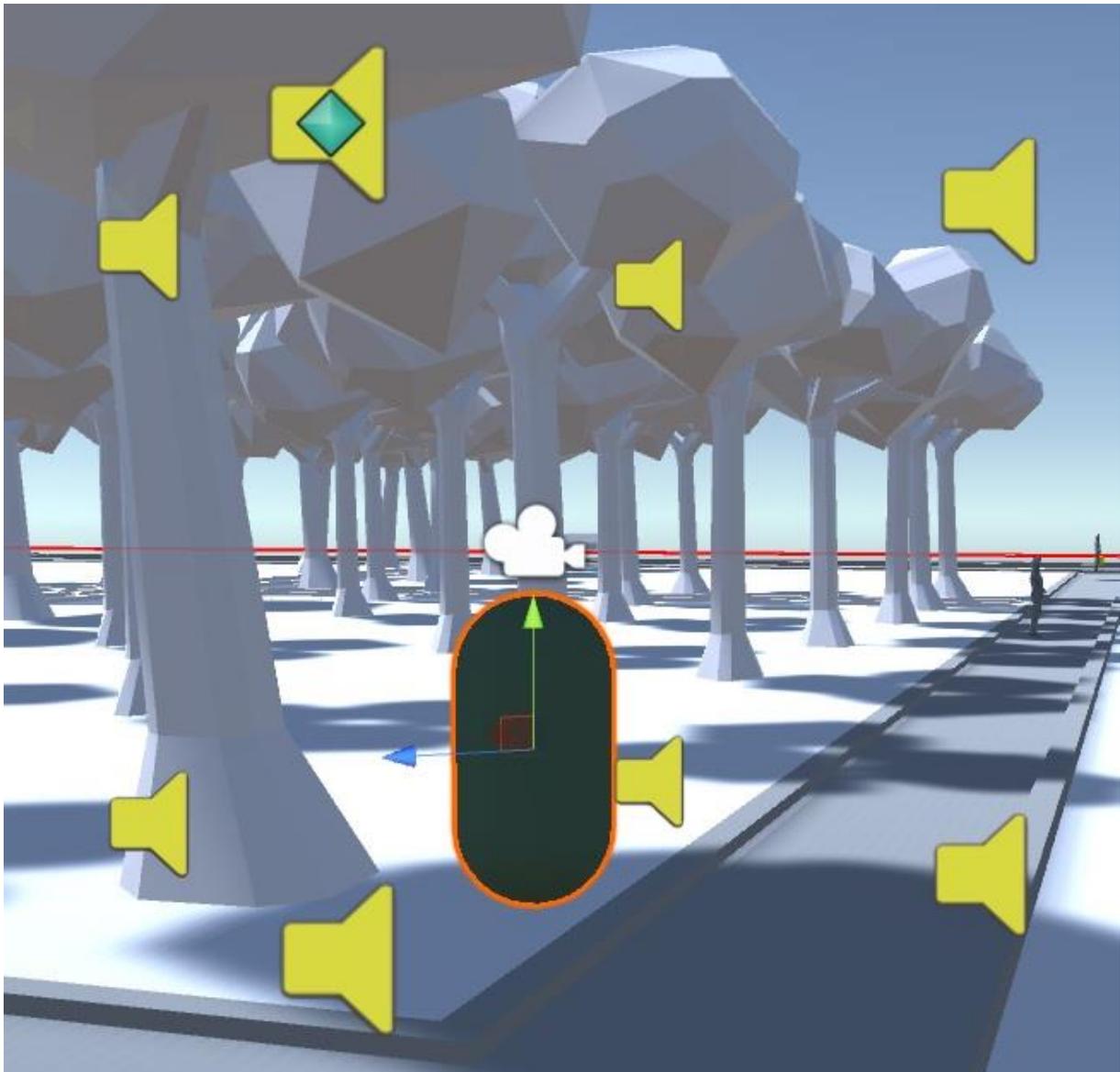


Abbildung 16: Unity Editor; 8-Kanal Grundatmo. (Eigene Darstellung)

Das Kamerasymbol im oberen Bild ist als Ort der VR-Brille und damit als Ort des Kopfes des Spielers zu verstehen. Der würfelförmige achtkanalige Aufbau ist an den Auro-3D Standard (Dickreiter 2014, S. 1737) angelehnt, um eine gute Umhüllung und Dreidimensionalität im Klang zu ermöglichen, da es sich durch die schlussendliche Binauralisierung um eine 3D-Audio Anwendung handelt. Jedes der acht gelben Lautsprechersymbole, die für den Spieler nicht sichtbar sind, steht für ein Audio GameObject in dem ein FMOD Event enthalten ist. Im ersten Szenario wird neben einer Windatmosphäre aus 8 dekorrelierten Mono-Tondateien zusätzlich eine

entfernte 8-Kanal Stadtatmosphäre gleicher Machart zugespielt. Durch das oben erwähnte Atmocubeswitch Script wird in den 8 Events die Szenariovariable „Atmoswitch“ beim Umschalten verändert, was dazu führt, dass die Atmosphäre, die durch den Klang von Fahrzeugen mit Verbrennermotor entsteht, ein- oder ausgeblendet wird. Dies soll die erwartete Pegelreduktion symbolisieren, wenn nur noch Elektrofahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen würden. Die keynotes des Stadtviertels wurden durch Blätterrauschen erweitert, dessen Audio GameObjects in verschiedenen Baumkronen situiert sind. Das Mischungsverhältnis ist hierbei so gewählt, dass dieses nur in Szenario zwei oder drei zu hören ist, um zu zeigen, dass eine Stadt ohne Fahrzeuge mit Verbrennermotoren wieder einer Hi-Fi Umgebung nach Schafer entspricht. Die biophonen Vogellaute unterstreichen dies nochmal. Diese wurden ebenfalls in Baumkronen verortet wie in folgendem Bild zu sehen.

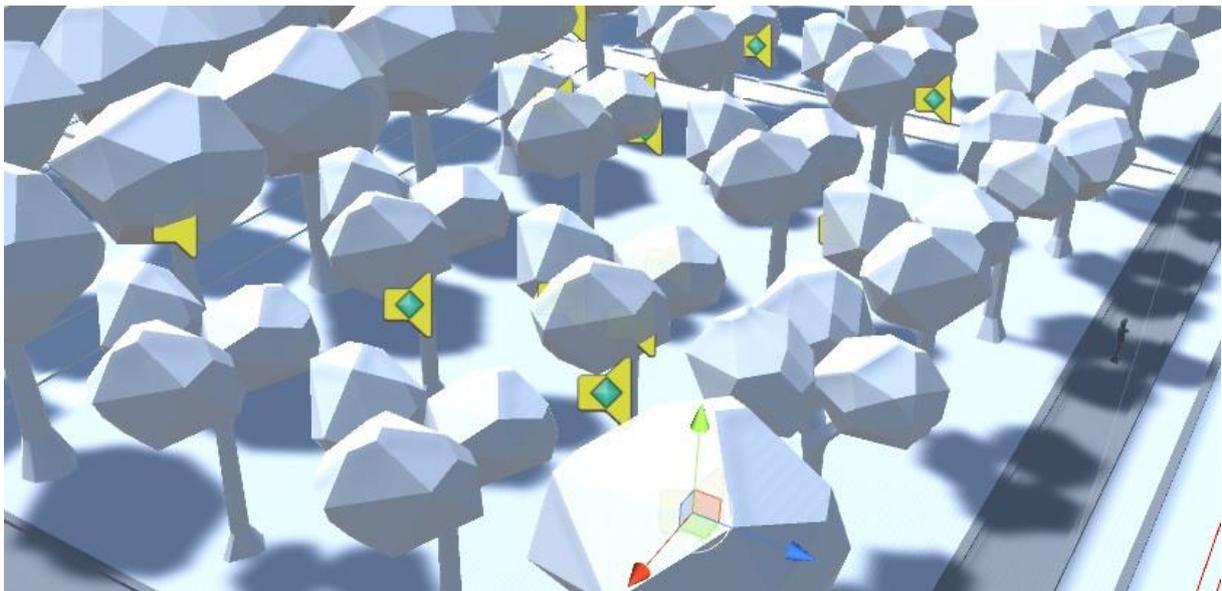


Abbildung 17: Unity Editor; Vogelklänge und Blätterrauschen. (Eigene Darstellung)

Zusätzlich wurden sie aber, wie die FMOD Events der Grundatmosphäre, mit der Atmoswitch-Variable verknüpft, um Bernie Krauses Nischentheorie zu berücksichtigen. Da durch den Motorenlärm wichtige Kommunikationskanäle von Lebewesen blockiert werden und diese Lebewesen dann in der Realität nicht mehr in der Stadt vorzufinden sind, ist neben der verringerten Häufigkeit der Vogellaute auch die Artenvielfalt in Szenario 1 verringert. Dieser Effekt ist aber subtil gehalten und beschränkt sich auf einheimische Vögel wie Tauben, Spatzen, Drosseln oder Raben, um realistisch zu wirken. Durch die Nutzung von „Scatterer Instruments“ (Firelight Technologies Pty Ltd. 2018), einem Logikelement aus FMOD, wurde ein höherer

Realismus bei der Implementation der Vogellaute durch Randomisierung der Abspielintervalle sowie Tonhöhe und Lautstärke erreicht. Eine weitere Eigenschaft eines Scatterer Instruments ist die Randomisierung des Ortes, an dem das FMOD Event in der Spielwelt zu hören ist. Durch Angabe eines Radius im Instrument wechselt der Ort des Vogellautes bei jedem Abspielen. Diese Funktion würde das Erstellen einer diversen und natürlich wirkenden akustischen Umgebung stark vereinfachen, jedoch funktionierte dies, wahrscheinlich aufgrund von Softwareinkompatibilitäten, nicht korrekt und konnte leider nicht verwendet werden. Für die Passantengeräusche wurden jeweils fünf verschiedene Schrittgeräusche, Hosengeräusche und Geräusche aneinander reibenden Stoffes verwendet. Diese wurden nach Geräuschart in je ein „Multi Instrument“ (Firelight Technologies Pty Ltd. 2018), einem weiteren Logikelement FMODs, eingefügt. Bei einem Schritt eines Passanten wird nach der Round-Robin-Methode (Fischer und Hofer 2011, S. 766) von jedem der drei Multi Instrumente randomisiert eines der fünf Tondateien mit leicht variierender Tonhöhe und Lautstärke abgespielt, was zu einer Vielzahl resultierender, immer unterschiedlicher Bewegungsgeräusche aus einer Mischung von 3 Tondateien führt. Dies verhindert bei einer schnellen Aufeinanderfolge von Schritten, Maschinengewehrfeuer ähnelnde Repetitionsrhythmen, die unnatürlich klingen, da jeder Schritt in der Realität bis zu einem gewissen Grad einzigartig klingt. Getriggert werden diese durch Markierungen, die im Unity Editor in die Ganganimation der AIThirdPersonController Prefabs genau zum Zeitpunkt des Auftretens eingefügt wurden. Nun kommen wir zum Aufbau der Fahrzeugklänge. Um eine gewisse Variabilität im Klang der Vorbeifahrten zu erhalten, wurden drei unterschiedliche Sounddesigns erstellt, die in je einem FMOD Event gespeichert sind. Jedes dieser Events enthält ein Verbrennerfahrzeug und ein Elektrofahrzeug Sounddesign zwischen denen über die Atmoswitch-Variable hin- und hergeblendet werden kann. Hinzu kommt das immer vorhandene Reifenabroll- und Windgeräusch, das in Szenario zwei mit stummen Elektrofahrzeugen alleine zu hören ist. Schematisch sind alle 3 FMOD Events gleich aufgebaut, es wird jedoch immer anderes Tonmaterial verwendet. Die drei letztendlich für die Echtzeit-Vertonung genutzten Variablen und programmseitige Implementierung der FMOD Events der Fahrzeugklänge kann man im CarEngineAudio Script in folgender Abbildung sehen.

```

1  using System.Collections;
2  using System.Collections.Generic;
3  using UnityEngine;
4  using UnityEngine.Vehicles.Car;
5  using FMODUnity;
6
7
8
9  public class CarEngineAudio : MonoBehaviour
10 {
11     FMODUnity.StudioEventEmitter eventEmitterRef;
12
13     public CarController CC;
14
15     void Awake()
16     {
17         eventEmitterRef = GetComponent<FMODUnity.StudioEventEmitter>();
18         eventEmitterRef.Play();
19     }
20
21
22     void FixedUpdate()
23     {
24         eventEmitterRef.SetParameter("RPM", CC.rpm);
25         eventEmitterRef.SetParameter("Gas", CC.gas);
26         eventEmitterRef.SetParameter("Geschw", CC.momentarySpeed);
27     }
28 }
29

```

Abbildung 18: Microsoft Visual Studio; CarEngineAudio Script. (Eigene Darstellung)

In diesem Script wird in der „Awake()“ Methode, die der „Start()“ Methode ähnelt – nur, dass diese an die Lebensdauer des verknüpften GameObjects, hier ein Fahrzeug, gebunden ist – das FMOD Event in das jeweilige Fahrzeug verortet und anschließend gestartet. In der „FixedUpdate()“ Methode werden die aktuellen Werte der Fahrzeugvariablen an das FMOD Event übergeben. Dieses Script muss im Unity Editor auf jedes Fahrzeug GameObject im untergeordneten Audio GameObject, in Abbildung 13 zu sehen, gelegt werden, damit die unterschiedlichen Scripts aufeinander zugreifen können. Im Verbrenner Sounddesign, in Abbildung 19 zu sehen, beeinflusst die „RPM“-Variable der Drehzahlsimulation, welche Tondatei als Loop abgespielt werden soll. Gleichzeitig geht mit steigender Drehzahlvariable eine aufsteigende Pitch Veränderung und ein Lautstärkeanstieg in Anlehnung an ein reales Fahrzeug einher. Diese Veränderungen wurden nach eigenem Empfinden aufeinander abgestimmt. Die „Gas“-Variable, die angibt, ob die AI gerade Gas gibt oder nicht, blendet hierbei zwischen aggressiveren Tondateien für die Beschleunigung und weicheren für die Entschleunigung des Fahrzeuges. Neben einer weiteren

Lautstärkeänderung, abhängig vom Wert der Variablen, werden verschiedene EQs verändert, wie ein Tiefpassfilter, dessen Grenzfrequenz bei „stärkerem Betätigen“ des Gaspedals erhöht wird und einem Filter mit Glockencharakteristik, der aggressive Frequenzbereiche bei Beschleunigung betont.

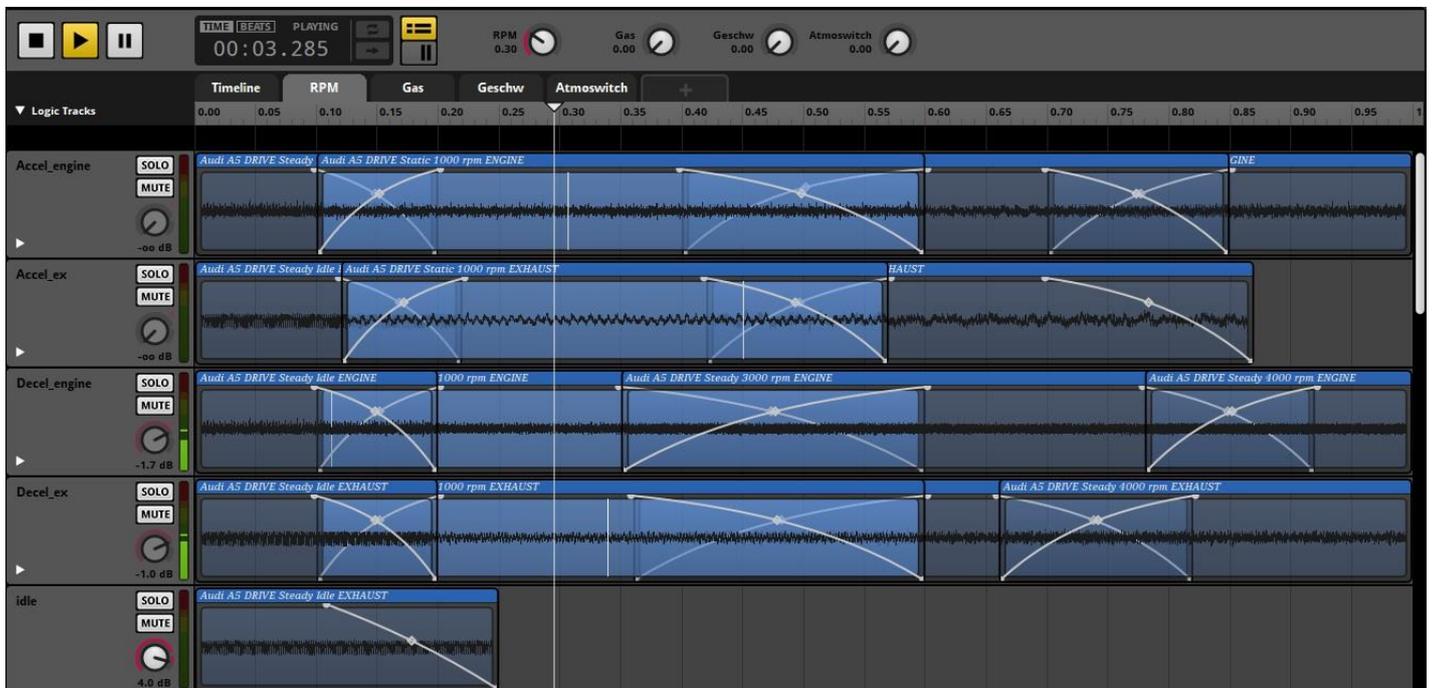


Abbildung 19: FMOD Event Editor; Auszug Verbrenner Sounddesign. (Eigene Darstellung)

Die Geschwindigkeitsvariable, die im Sinne der Maximalgeschwindigkeit der Fahrzeuge einen Wertebereich von 0 bis 50 hat, bewirkt einerseits bei steigender Geschwindigkeit eine leichte Erhöhung der Gesamtlautstärke aber bei geringen Geschwindigkeiten eine Basserhöhung, um den dunkleren Klang von Fahrzeugen beim Anfahren zu simulieren. Diese drei Parameter ermöglichen es durch teilweise auch gegensätzliche Veränderungen viele Klangzustände eines Fahrzeuges nachzustellen. So regelt die Geschwindigkeitsvariable beispielsweise bei geringen Geschwindigkeiten die Gesamtlautstärke des Fahrzeugklanges herunter aber die „Gas“-Variable erhöht die Lautstärke einzelner Klangkomponenten, was im ersten Moment als sinnlose Gegenbewegung erscheint aber durch die unterschiedlichen zeitlichen Veränderungen der Variablen zu einem organischen und bewegten Klang führt. Die Reifenabroll-, Wind- und Elektrofahrzeugtondateien werden auf ähnliche Weise durch die Geschwindigkeits- und „Gas“-Variable manipuliert, da die Drehzahl und Gangsimulation bei Elektrofahrzeugen keine Relevanz mehr hat. Die Elektrofahrzeugklänge wurden in einer solchen Weise implementiert, dass sie bei

geringen Geschwindigkeiten am lautesten sind und ab 30 km/h dem Reifenabroll- und Windgeräusch mehr Raum lassen.

4.2.4. Steam Audio

Das Steam Audio Plugin (Valve Corporation 2018) wurde für die Binauralisierung der Tonausgabe genutzt und bietet einige weitere interessante Eigenschaften, die zum Realismus beitragen. Stienen und Vorländer (2015, S. 777) betonen in ihrem Artikel die Wichtigkeit der Einbindung aller physikalischen Prozesse und Interaktionen, die die Übertragung von der Schallquelle zum Hörer beeinflussen. Hierzu gehört die entfernungsbedingte Absorption von Frequenzbändern, die als Option im Steam Audio Plugin angewählt werden kann und neben den sehr guten Ortungseigenschaften der Binauralisierung einiges zum Realismus beiträgt. Die nach physikalischen Gesetzen berechnete auswählbare entfernungsbedingte Pegelminderung konnte aber leider nicht überzeugen, weshalb eine Lösung von FMOD mit Minimal und Maximalentfernung, zwischen denen die Lautstärke abfällt, genutzt werden musste. Aufgrund der zeitnahen Erstveröffentlichung des Steam Audio Plugins für FMOD Anfang diesen Jahres konnten die sehr vielversprechenden Optionen der Schallverdeckungs-, oberflächenabhängigen Reflexions- und umgebungsbedingten Hallberechnung nicht genutzt werden, da diese leider nicht funktionierten, was aber in der Zukunft durch Updates behoben werden könnte und einen großen Schritt nach vorne in Sachen realistischer Simulation akustischer Umgebungen bedeuten würde.

4.3 Auswertung und Erweiterungsmöglichkeiten

Die VR-App befindet sich noch im oben beschriebenen Entwicklungsstadium und ist bisher nur innerhalb des Unity-Editors mit VR-Brille zu erleben, was eine Auswertung mittels einer quantitativen Befragung durch den noch großen Aufwand für die Testpersonen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich macht. Aus der persönlichen Nutzererfahrung des Autors und der Mitarbeiter der Firma Kling Klang Klong, die im Weiteren als Testpersonen bezeichnet werden sollen, lässt sich aber schon erkennen, dass Simulationen dieser Art der richtige Weg sind, um Veränderungen eines Soundscapes zu beurteilen. Die gute Immersion in das Stadtviertel ist nach der Meinung aller Testpersonen durch die technischen und gestalterischen Merkmale der App gegeben, weshalb die Auswirkungen der Verordnung Nr.540/2014 auf das Soundscape der Stadt überzeugend erlebbar sind. Nach dem Wechsel vom ersten

Verbrenner-Szenario zum zweiten Szenario der Elektrofahrzeuge ohne AVAS war für viele Testpersonen der Moment am Bedeutendsten, wenn der erste Fußgänger am Hörer vorbeigeht und man nun dessen Schritte hören kann. Daraus lässt sich folgern, dass auch die eigenen Schritte in einer solchen Umgebung hörbarer würden, was nach Wrightson ein Indiz für eine geringe Isolation des Menschen in seiner akustischen Umgebung darstellt, die eine wichtige Rolle bei der Bewertung von Schallereignissen als Lärm spielt (Wrightson 1999, S. 11). Durch den erhöhten Detailreichtum wirkte das Gehörte für die meisten Testpersonen interessanter und angenehmer. Verschiedene Vogelrufe konnten deutlicher gehört und Geräusche von gegenüberliegenden Straßenseiten besser erkannt werden. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass verminderter Verkehrslärm das Leben in einer Stadt immens beeinflussen würde und eventuell sogar dazu führen könnte, dass weniger Menschen den Lärm der Stadt durch Soundwalls, wie Schafer behauptet, verdrängen wollen. Das würde eine verstärkte Gemeinschaft fördern, da man einfacher miteinander kommunizieren könnte und der Fokus des Einzelnen nach außen, anstatt nach innen gerichtet würde. Das Soundscape im zweiten Szenario direkt an einer Straße wurde insgesamt ruhiger empfunden und spiegelte die Umgebung deutlicher wieder. Hier ließ sich aber auch die Gefahr erkennen, die ruhigere Fahrzeuge für visuell benachteiligte oder abgelenkte Passanten darstellen, da manche Testpersonen von einem vorbeifahrenden Fahrzeug überrascht wurden. Das dritte Szenario wurde auch positiv aufgenommen, da sich einige wie in ein „Science-Fiction“-Szenario versetzt fühlten und sich die Aufmerksamkeit auf die neuartigen Klänge der Fahrzeuge lenkte. Bedenkt man aber den eine gewisse Zeit dauernden Gewöhnungsprozess, könnten diese Klänge irgendwann wie die der Verbrennerfahrzeuge als Lärm bewertet werden, weshalb man dann zwar etwas leisere aber dennoch oft störende Schallquellen geschaffen hätte. Dies wird durch die Tatsache unterstützt, dass die gesetzlichen Verordnungen ein Sounddesign vorsehen, das dem eines vergleichbaren Fahrzeugmodells mit Verbrennermotor entspricht (EU-Parlament und Rat 16.4.2014, S. 176), um die schon erlernte Klangerfahrung der Bevölkerung im Straßenverkehr auszunutzen. Einige Testpersonen wünschten sich jedoch eine überspitzte Darstellung der Veränderungen, um für eventuelle spätere Hörer die Veränderungen deutlicher zu machen, was im Rahmen einer Ausstellung, in der auf plakativere Weise auf den Sachverhalt aufmerksam gemacht werden soll, eher Sinn machen würde. Der Autor entschied sich aber dazu, die Veränderungen so realistisch wie möglich zu halten, da dies seiner

Meinung nach den Zielen dieser Arbeit am meisten entspricht, einen Grundstein für eine Soundscapesimulationsumgebung zu setzen. Zusammenfassend ließ sich aus den verschiedenen Meinungen erkennen, dass die Möglichkeit, den Klang von Elektrofahrzeugen zu erstellen, eine große Chance für das alltägliche Leben in einer Stadt darstellt, derer man sich nicht bewusst ist, da man Verkehrslärm in einer Stadt oft als gegeben hinnimmt. Zusätzlich konnte man durch die Nutzung der App erkennen, dass der Fokus im Fahrzeugsounddesign bezüglich des Außengeräusches auf das Zusammenspiel verschiedener Fahrzeuge, weg vom perfekten Sounddesign eines einzelnen Fahrzeuges, verschoben werden sollte. Einigen Testpersonen gefiel tatsächlich das zweite Szenario ohne AVAS am besten. Wenn man bedenkt, dass ein Fahrzeug ein Hilfsmittel sein und nicht im Vordergrund das Leben negativ beeinflussen sollte und die technischen Möglichkeiten autonomer Fahrzeuge berücksichtigt, kommt man zu dem Schluss, dass die gesetzlichen Verordnungen nur eine pragmatische Übergangslösung darstellen sollten und man die Sicherheit im Straßenverkehr langfristig auf eine andere Weise sicherstellen muss, anstatt die vielen Nachteile, die im Verlauf dieser Arbeit genannt wurden, hinzunehmen. Es gibt selbstverständlich noch einiges an der VR-App zu verbessern und auszubauen, wodurch man fundiertere Ergebnisse für die Planung von Projekten im Sinne einer schnellen Prototyperstellung erhalten könnte. Ein wichtiger erster Punkt wäre die Weiterentwicklung des Steam Audio Plugins, damit die Audioberechnungen realitätsnäher und das Realismusempfinden des Hörers weniger von beispielsweise der gestalterischen Mischung der Pegelverhältnisse abhängig ist. Im Idealfall sollte sich die akustische Umgebung nur aus der Interaktion der Einzelschallquellen und der erstellten 3D-Landschaft mit Materialkoeffizienten für Reflektions- und Verdeckungsrechnungen ergeben. Der Pegel der Einzelschallquellen könnte dann, wie üblicher Weise in dB(A) über eine Messung in 1 Meter Entfernung der Wirklichkeit entnommen, in die 3D-Umgebung übertragen und dort auf die gleichweise eingestellt und überprüft werden. Die Wiedergabe müsste dann über ein kalibriertes Kopfhörersystem, am besten verbunden mit einer HRTF-Messung jeder Testperson, um die Binauralisierung zu perfektionieren, erfolgen. Dem sind aber verschiedene Grenzen wie beispielsweise der Rechenleistung, gesetzt. Da es sich beim urbanen Raum um eine Art offenes System handelt auf dessen Akustik in der echten Welt auch aus weiter Entfernung Einfluss genommen wird, benötigt dies, wie auch Stienen und Vorländer erkannt haben, immer der Vereinfachung, weshalb gestalterische Einflüsse immer Teil der Erstellung einer

solchen Simulation sein werden. Es gibt in Städten einfach zu viele individuelle und variable Schallquellen, als dass man alle simulieren könnte, was die 1.150.191 (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014, S. 19 ff.) im Jahr 2012 zugelassenen Fahrzeuge in Berlin und die weiter steigende Motorisierung der Einwohner veranschaulicht. Der nächste wichtige Punkt wäre die Schaffung einer AI zur Verkehrsregelung und Erweiterung der Fahrzeug AI, um den Einbau mehrerer Fahrzeuge in die App zu ermöglichen. Im aktuellen Stand ist kein Ampelsystem implementiert um die Vorfahrt an der Kreuzung zu regeln und die Fahrzeuge haben noch keine Sensoren, die ein Ausweichen oder Bremsen bei Hindernissen oder anderen Verkehrsteilnehmern ermöglichen. Somit stoßen bei einer aktuellen Anzahl von fünf Fahrzeugen diese nach ungefähr zwei Minuten ab und zu zusammen, weshalb dies die aktuelle Maximalanzahl an Fahrzeugen darstellt. Mit mehr Fahrzeugen ließen sich dann auch akustische Umgebungen zu verschiedenen Tageszeiten wie den Hauptverkehrszeiten im Berufsverkehr simulieren, während denen die Lärmbelastung aufgrund der hohen Fahrzeuganzahl und eventuellen Staubildung erhöht wäre, was für einen Soundscapevergleich bezüglich des hier relevanten Themas sehr interessant wäre. Eine Erweiterung der Verkehrsteilnehmer um verschiedene Fahrzeugklassen und Polizei- oder Rettungswagen würde die Vielfalt der Klänge erweitern und man könnte den Fragen nachgehen, wie sich die Sirennutzung solcher Sonderfahrzeuge verändern und ob Fahrradfahrer vielleicht besser gehört werden könnten oder wie ein Akustikdesign klingen muss, um verschiedene Fahrzeugtypen am Klang zu erkennen. Momentan kann sich eine Testperson mittels Tastatur und Kopfdrehung frei in der 3D-Welt bewegen, weshalb eine Evaluation verschiedener Szenarien von genau gleichen Orten erschwert ist. Dies könnte man durch eine geringe Anzahl an festen Positionen, zu denen man per Knopfdruck wechseln kann, erreichen. Dies verhindert es zwar, virtuelle Soundwalks nach Schafer zu unternehmen, aber es würde eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei Befragungen und höhere Kontrolle der auf die Testperson wirkenden Schallereignisse ermöglichen. Positionen in verschiedenen Abständen zur Straße in den verschiedenen Quadranten wären denkbar und auch eine Abhörposition innerhalb einer Wohnung des Stadtviertels wäre interessant. Dadurch könnte man erfahren, wie ein Fahrzeugsounddesign auf Menschen in ihren privaten Räumen wirken würde, was bezüglich Lebensqualitätsbeurteilungen und Lärmbelastungseinschätzungen sicher relevante Daten liefern könnte. Auch eine Position innerhalb eines Fahrzeuges wäre

sicher hoch interessant. In der Automobilindustrie werden alle Aspekte eines neuen Fahrzeugmodells bevor dieses auf dem Markt kommt beispielsweise verschleiert als Erlkönige auch im Straßenverkehr ausführlich getestet (SPIEGEL ONLINE et al. 2012). Diese Tests könnten für Systemsounds oder andere relevante Klänge innerhalb des Fahrzeuges vorab virtuell durchgeführt werden, um eine schnelle Erkenntnisgewinnung und notwendige Anpassung zu ermöglichen. Autonome Automobile, die momentan in der Testphase sind, bieten durch ihre technischen Möglichkeiten eventuell eine lautlose Lösung des Sicherheitsproblems elektrisch angetriebener Fahrzeuge bei geringen Geschwindigkeiten. Mithilfe der App könnten auf spielerische Weise im Sinne der Gamification (Wikipedia 2018) neue Arten eines AVAS in Kombination mit der Technologie in autonomen Fahrzeugen getestet werden. Die Firma Ustwo befasst sich in ihrem Dokument „Humanising Autonomy“ (Smith und Vardhan Zugriff 2018) mit einem menschenzentrierten Design autonomer Fahrzeugtechnologie. Dort wird auch der Frage des Klanges des autonomen Fahrens nachgegangen, für welches oft Fahrzeuge mit Elektroantrieb verwendet werden, wodurch Sie zum Ergebnis kommen, dass ein kontextbewusstes und intelligentes Warnsystem, das zum richtigen Zeitpunkt ein sinnvolles Geräusch an die richtigen Empfänger aussendet, eine bessere Lösung des Sicherheitsproblems bei geringerer Lärmbelastung bietet als der skeuomorphe Ansatz einer Dauerbeschallung, wie in den gesetzlichen Verordnungen gefordert (Smith und Vardhan Zugriff 2018, S. 470). In ihrer Prototypentwicklung mittels einer eigenen VR-App werden verschiedene Warnklänge nur bei Erkennung eines Passanten ausgesendet. Sie verweisen auch auf die hohe Nutzung persönlicher mobiler Endgeräte und die verminderte Aufmerksamkeit von Fußgängern und haben die Idee, diese Geräte in die Warnung vor Fahrzeugen miteinzubeziehen, indem über Kopfhörersignale oder Vibrationen des Endgerätes vor Fahrzeugen gewarnt wird (Smith und Vardhan Zugriff 2018, S. 478). Diese Gedanken ließen sich auch in der hier entwickelten VR-App implementieren, bei dem jedes Fahrzeug ein Warnsignal aussendet, sobald ein Fußgänger in einem Radius von beispielsweise 25 Meter erkannt wird, was bei einer Geschwindigkeit von innerstädtisch maximal 50 km/h als Bremsweg im Notfall genug Sicherheit bieten müsste. Die erstellte VR-App stellt also – wie im Vorangegangenen gezeigt wurde – eine gut ausbaufähige Plattform dar, die bei Weiterentwicklung viele weitere Erkenntnisse für viele verschiedene Themenbereiche liefern könnte.

5. Fazit

Durch die Einführung in den Forschungsbereich Soundscape am Anfang wurde zwischen akustischen Umgebungen und Soundscapes differenziert. Die komplexe Wahrnehmung akustischer Umgebungen und die Einflussnahme des jeweiligen Kontexts ist ein immens wichtiger Aspekt für die Auswertung von individuellen Soundscapes und benötigt besondere Methoden. Die Veränderungen des natürlichen Soundscape bis in die heutige Zeit verdeutlicht die Diskrepanz zwischen lo-fi und hi-fi Soundscapes und zeigt, welche Vorteile eine Wiederherstellung annähernd präindustrieller hi-fi Verhältnisse haben könnte. Der fast lautlose Klang der Elektromobilität bietet eine Möglichkeit, dies zu erreichen. Gleichzeitig besteht jedoch auch eine Gefahr für andere, eventuell beeinträchtigte Verkehrsteilnehmer, die sich häufig auf eine akustische Vorwarnung von Fahrzeugen verlassen. Gesetzliche Verordnungen gehen einen pragmatischen Weg diese Gefahr zu beheben, indem ein Dauergeräusch in Form eines AVAS vorgeschrieben wird. Die Chance, die die Elektromobilität für urbane Soundscapes bietet, wird hiermit aber vertan, vor allem da schon andere technologische Möglichkeiten bestehen, um die Sicherheit für gefährdete Passanten zu gewährleisten. Eine geeignete Methode zur Soundscapebeurteilung stellt eine VR-App als Testumgebung dar, dessen Erstellung im Verlauf der Arbeit erläutert wurde. Die Nutzung durch eine kleine Testgruppe bestätigte die Plattformwahl der App-Erstellung und ließ den Trend erkennen, dass stumme Elektrofahrzeuge am angenehmsten für das urbane Soundscape empfunden wurden. Betrachtet man die technologischen Möglichkeiten autonomer Fahrzeuge, ergibt sich die Möglichkeit, über anonyme Personenerkennung gezielte Warnsignale zu senden, die eine Dauerbeschallung überflüssig machen würde. Die Lärminderung innerhalb eines urbanen Soundscape hätte auch viele gesundheitlich positive Effekte und könnte die Entstehung von Krankheiten verhindern. Zusätzlich würde der urbane Raum wieder einen geeigneten Lebensraum für Tiere darstellen, könnten diese ihre natürlichen Kommunikationskanäle wieder nutzen. Die VR-App stellt ein ausbaufähiges Werkzeug dar, mit dessen Hilfe bei Weiterentwicklung verschiedenste weitere Fragestellungen auch im Rahmen von Studien beantwortet werden könnten.

Literaturverzeichnis

Avid Technology, Inc. (Hg.) (2015): Pro Tools 12 Documentation. Online verfügbar unter http://avid.force.com/pkb/articles/en_US/User_Guide/Pro-Tools-12-Documentation, zuletzt geprüft am 2018.

Brown, A. L.; Kang, Jian; Gjestland, Truls (2011): Towards standardization in soundscape preference assessment. In: *Applied Acoustics* 72 (6), S. 387–392. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.01.001.

Carlyle, Angus (Hg.) (2007): Autumn leaves. Sound and the environment in artistic practice. Paris, France: Association Double-Entendre in association with CRISAP.

DEKRA e.V. (Hg.) (2016): Fußgänger beim Überqueren der Straße: Riskante Ablenkung durch Smartphones. Online verfügbar unter https://media.dekra.com/media/press_media/pi2016/04_2016/04_2016_dokumente/pi16_038_auto_fussgaenger_ablenkung_smartphones_ws_pdf.pdf, zuletzt geprüft am 03.04.2018.

Dickreiter, Michael (Hg.) (2014): Handbuch der Tonstudioteknik. 8., überbearb. und erw. Aufl. Berlin: De Gruyter.

EU-Parlament und Rat (16.4.2014): Verordnung Nr. 540/2014 über den Geräuschpegel von Kraftfahrzeugen und von Austauschschalldämpferanlagen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 70/157/EWG. EU Nr. 540/2014. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0540>, zuletzt geprüft am 2018.

Europe, W. Regional Office for H.O. (2011): Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1582968>.

Fastl, Hugo; Patsouras, Christine (Zugriff 2018): Das rote Auto ist lauter! Psychophysik audio-visueller Interaktionen. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1138389/223805.pdf>, zuletzt geprüft am 2018.

Firelight Technologies Pty Ltd. (Hg.) (2018): FMOD Studio User Manual 1.10. Online verfügbar unter <https://www.fmod.com/resources/documentation-studio?page=welcome-to-fmod-studio.html>, zuletzt geprüft am 2018.

Fischer, Peter; Hofer, Peter (2011): Lexikon der Informatik. 15., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-15126-2>.

Focus Online (2017): Globaler Vergleich: Wo das Elektroauto den größten Zulauf hat. Online verfügbar unter https://www.focus.de/auto/elektroauto/china-vorn-deutschland-zieht-langsam-nach-globaler-vergleich-wo-das-elektroauto-den-groessten-zulauf-hat_id_7461937.html, zuletzt aktualisiert am 11.08.2017, zuletzt geprüft am 02.04.2018.

Friesecke, Andreas (2014): Die audio-Enzyklopädie. Ein Nachschlagewerk für Tontechniker. 2. Auflage. Berlin, Germany, Boston, Massachusetts: De Gruyter Saur (de Gruyter Reference). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=11010302>.

Gage, S.; Ummadi, P.; Shortridge, A.; Qi, J.; Jella, P. K. (2004): Using GIS to develop a network of acoustic environmental sensors. Michigan State University. San Diego (In ESRI International Users Conference). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/228604069_Using_GIS_to_develop_a_network_of_acoustic_environmental_sensors, zuletzt geprüft am 2018.

Hannoschöck, Elena (2009): Soundscapes und Lärm. Zur kulturellen Wahrnehmung und Deutung von Klängen (Vokus, 19/2). Online verfügbar unter <https://www.fbkultur.uni-hamburg.de/vk/forschung/publikationen2/vokus/vokus200902/media/hannoschoeck-vokus2009-2.pdf>, zuletzt geprüft am 2018.

Justin Winkler (2006): Klanglandschaften. Untersuchungen zur Konstitution der klanglichen Umwelt in der Wahrnehmungskultur ländlicher Orte in der Schweiz. Geographisches Institut Universität Basel. Basel. Online verfügbar unter http://www.iacsa.eu/jw/winkler_klanglandschaften_1995.pdf, zuletzt geprüft am 2018.

Kang, Jian (2007): Urban sound environment. 1. publ. London u.a.: Taylor & Francis.

Kang, Jian; Schulte-Fortkamp, Brigitte (Hg.) (2017): Soundscape and the built environment. First issued in paperback. Boca Raton, London, New York: CRC Press.

Krause, Bernie (2008): Anatomy of the Soundscape. Evolving Perspectives. In: *J. Audio Eng. Soc* 56 (1/2), S. 73–80. Online verfügbar unter <http://www.aes.org/elib/browse.cfm?elib=14377>.

Mit Kopfhörer unterwegs? - DVR. Online verfügbar unter <https://www.dvr.de/presse/informationen/infografiken/4187.html>, zuletzt geprüft am 03.04.2018.

NHTSA (2011): Incidence rates of pedestrian and bicyclist crashes by hybrid electric passenger vehicles. An update. Washington, DC.: National Highway Traffic Safety Administration.

Norman, Don (2014): What Noise Does The Electric Car Make? Hg. v. MIT Technology Review, zuletzt geprüft am 2018.

Radicke, S. R. (SS 2017). Vorlesung: Theory of Game Development. Hochschule der Medien. Stuttgart, SS 2017.

Schafer, Raymond Murray (1994): The soundscape. Our sonic environment and the tuning of the world. Rochester, Vt: Destiny Books. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0644/93006392-d.html>.

Schafer, Raymond Murray (2010): Die Ordnung der Klänge. Eine Kulturgeschichte des Hörens. Neu übersetzte, durchgesehene und ergänzte deutsche Ausgabe. Mainz: Schott.

Schulte-Fortkamp, B.; Kang, Jian (2013): Introduction to the special issue on soundscapes. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 134 (1), S. 765–766. DOI: 10.1121/1.4810760.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2014): Mobilität der Stadt: Kenndaten zur Mobilität. Online verfügbar unter https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/download/Mobilitaet_dt_Kap-1-2.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2018.

Smith, Tim; Vardhan, Harsha (Zugriff 2018): Humanising Autonomy. Where are we going? Hg. v. Ustwo Fampany Limited. Registered No. 05286528. Registered in England & Wales. Online verfügbar unter <https://ustwo.com/auto/humanisingautonomy>.

SPIEGEL ONLINE; Hamburg; Germany (2012): Erlkönige: Versteckspiel auf der Straße - SPIEGEL online - Auto. Online verfügbar unter <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/tarnung-von-erlkoenigen-a-805450.html>, zuletzt aktualisiert am 28.07.2012, zuletzt geprüft am 09.04.2018.

Stienen, Jonas; Vorländer, Michael (2015): Auralization of Urban Environments. Concepts towards New Applications. RWTH Aachen University. Aachen (RWTH-2016-00429). Online verfügbar unter <http://www.conforg.fr/euronoise2015/proceedings/data/articles/000287.pdf>, zuletzt geprüft am 2018.

Tesla (Hg.) (2018): Hardware für autonomes Fahren in allen Fahrzeugen. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/autopilot, zuletzt geprüft am 2018.

UNECE (12.01.2017): Regelung Nr. 138 der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) _ Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung geräuscharmer Straßenfahrzeuge hinsichtlich ihrer verringerten Hörbarkeit[2017/71]. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42017X0071&from=DE>, zuletzt geprüft am 2018.

Unity Technologies (Hg.) (2017a): Unity Scripting Reference. Online verfügbar unter <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/index.html>, zuletzt geprüft am 2018.

Unity Technologies (Hg.) (2017b): Unity User Manual (2017.3). Online verfügbar unter <https://docs.unity3d.com/Manual/UnityManual.html>, zuletzt geprüft am 2018.

Valve Corporation (Hg.) (2018): Steam Audio Manuals. Online verfügbar unter <https://valvesoftware.github.io/steam-audio/downloads.html>, zuletzt geprüft am 2018.

Wikipedia (Hg.) (2018): Gamification. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=172854459>, zuletzt aktualisiert am 02.04.2018, zuletzt geprüft am 09.04.2018.

Wrightson, Kendall (1999): An Introduction to Acoustic Ecology (Journal of Electroacoustic Music, Volume 12). Online verfügbar unter http://ciufo.org/classes/ae_fl13/reading/Intro_AE.pdf, zuletzt geprüft am 2018.

Zeller, Peter (2009): Handbuch Fahrzeugakustik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.