

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien

# Entwicklung eines akustisch/interaktiven Visualisierungssystems

vorgelegt von Micha Mäcke

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 31.08.2016

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Engineering

Erst-Prüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweit-Prüfer: Prof. Dr. Andreas Koch



## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, Micha Mäckle, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Entwicklung eines akustisch/interaktiven Visualisierungssystems“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut 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, 30. August 2016

Ort/Datum

Unterschrift



# **Zusammenfassung**

Durch spezielle interaktive Systeme können akustische Signale aufgenommen, in optische Signale transformiert und visuell dargestellt werden. Dabei kann die Steuerung dieser grafischen Darstellung direkt über den lokalen Schalldruckpegel akustisch emittierender Objekte erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird mittels der Akustischen Kamera der Gesellschaft für angewandte Informatik (GFaI) ein solches System entwickelt und hinsichtlich seiner Funktionalität überprüft. Außerdem wird eine Möglichkeit erarbeitet, die visuelle Ausgabe optisch zu modifizieren. Abschließend wird das System zur filmischen Aufnahme eines Musikstücks und der daraus resultierenden, projizierten grafischen Darstellung verwendet. Zudem wird auf Fragen der Voraussetzungen diesbezüglicher Anwendungen eingegangen.

## **Abstract**

Acoustic signals can be recorded, transformed in optical signals and visually projected due to special interactive systems. Though the visualization is directly determined by the local acoustic emissions of an object. In order to evolve such an interactive system, the Acoustic Camera, designed by the Society for the Promotion of Applied Computer Science (GFaI), will be used in this Thesis. Moreover, this system will be tested with respect to functionality. Additionally possibilities of modifying the displayed visuals will be analysed. Finally, the developed interactive system will be used for visualizing live-music within the framework of video clip. Also conditions of functionality will be examined.



# 1. Inhalt

2. Abbildungsverzeichnis .....	III
3. Tabellenverzeichnis.....	V
1. Einführung.....	1
1.1. Motivation .....	1
1.2. Problemstellung .....	1
1.3. Zielsetzung und Forschungsfragen.....	2
1.4. Aufbau der Arbeit .....	2
2. Hintergründe .....	3
2.1. Wahrnehmungspsychologie .....	3
2.1.1. Schall und Methoden der menschlichen Schallwahrnehmung.....	4
2.1.2. Binaurales Hören, Schalllokalisierung und räumliche Schallwahrnehmung...	6
2.1.3. Sehen.....	8
2.1.4. Sinnesmodalität .....	9
2.2. Multimodale Erfahrung im medialen Kontext .....	9
3. Visualisierung von Audiosignalen .....	10
3.1. Visualisierung durch VJing .....	11
3.2. Projektion als Möglichkeit der Visualisierung .....	11
3.3. Geschichte der Projektion.....	12
3.4. Schall-Visualisierung.....	13
3.4.1. Akustische Kamera .....	14
3.4.2. Anwendungsbereiche .....	23
3.4.3. Probleme .....	23
4. Entwicklung und Überprüfung eines Live- Systems zur Transformation auditiver in visuelle Signale .....	26
4.1. Überblick Vorgehensweise .....	26
4.1.1. Zielsetzung.....	26
4.1.2. Vorgehensweise .....	26
4.2. Anforderungen an das System .....	26
4.2.1. Systemarchitektur.....	27

4.3.	Aufbau des Systems zur visuellen Wiedergabe akustischer Signale .....	28
4.3.1.	Auswahl der Systemkomponenten und der Schallquelle.....	28
4.3.2.	Technischer Aufbau und Software.....	28
4.3.3.	Pipeline .....	31
4.3.4.	Aufstellung und Projektion.....	31
4.3.5.	Grafische Bearbeitung.....	33
4.4.	Überprüfung des entwickelten Systems anhand bestimmter Anforderungskriterien .....	34
4.4.1.	Vorgehensweise .....	34
4.4.2.	Durchführung .....	39
4.4.3.	Zusammenfassung und Probleme .....	49
5.	Umsetzung der Entwicklung .....	50
5.1.	Vorbereitung.....	50
5.2.	Umsetzung und Probleme.....	51
6.	Zusammenfassung und Fazit.....	54
7.	Ausblick .....	55
8.	Literaturverzeichnis .....	56
9.	Anhänge.....	61
9.1.	Anhang A1 .....	61
9.2.	Anhang A2 .....	61
9.3.	Anhang A3 .....	63
9.4.	Anhang A4 .....	64

## 2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verbindungen der Akustischen Kamera, Quelle: gfai tech GmbH .....	15
Abbildung 2: Lokalisierungsprinzip der Akustischen Kamera, Quelle: gfai tech GmbH .....	16
Abbildung 3: Sum-and-Beamforming-Formel, Quelle: gfai tech GmbH.....	16
Abbildung 4: Beispielhafter Signalfluss des Beamforming-Prozesses im Zeitbereich, Quelle: gfai tech GmbH .....	17
Abbildung 5: Beispielhafter Signalfluss des Beamforming-Prozesses im Frequenzbereich, Quelle: gfai tech GmbH .....	18
Abbildung 6: Mikofon-Strang für individuelle Konstruktion, Quelle: gfai tech GmbH .....	19
Abbildung 7: Mikrofonskapsel mit Verstärker, Quelle: gfai tech GmbH .....	19
Abbildung 8: Ring 48-75 AC Pro, Quelle:gfai tech GmbH .....	20
Abbildung 9: Ring 48-75 AC Pro, Detail, Quelle:gfai tech GmbH .....	20
Abbildung 10: Ring 32-35 AC Pro, Quelle: gfai tech GmbH.....	20
Abbildung 11: Sphere 48-35 AC Pro, Quelle: gfai tech GmbH .....	20
Abbildung 12: Datenrekorder mcdRec 721, Quelle: gfai tech GmbH .....	21
Abbildung 13: Noise Image - Parallel-Analyse, Quelle: gfai tech GmbH.....	22
Abbildung 14: Noise Image - Kartierung auf 3DModell, Quelle: gfai tech GmbH.....	22
Abbildung 15: 3D-Modell eines Fahrzeug-Innenraums mit Kartierung, Quelle: gfai tech GmbH .....	22
Abbildung 16: Fokus auf strukturierter Messebene, Quelle: gfai tech GmbH .....	24
Abbildung 17: Fokusabhängigkeit unterschiedlicher Mikrofons-Arrays, Quelle: gfai tech GmbH .....	24
Abbildung 18: Beziehung der Verzögerungstiefe (dt) zur Wellenlänge, Quelle: gfai tech GmbH .....	25
Abbildung 19: Räumliche Auflösung von 500Hz, Quelle: gfai tech GmbH .....	25
Abbildung 20: Räumliche Auflösung von 5kHz, Quelle: gfai tech GmbH .....	25
Abbildung 21: Gliederung des Systems nach Kategorien von Systemanforderungen, Eigene Darstellung.....	27
Abbildung 22: Pipeline des audiovisuellen Live-Systems - Eigene Darstellung .....	31
Abbildung 23: Versuchsaufbau von hinten, Quelle: Eigene Darstellung .....	32
Abbildung 24: Versuchsaufbau von vorn, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abbildung 25: ScreenCapturerGrid, Quelle: Eigene Darstellung .....	33
Abbildung 26: SpoutGrid, Quelle: Eigene Darstellung .....	34
Abbildung 27: Testschema für Software nach Hoffmann - Eigene Darstellung.....	35
Abbildung 28: Versuchsaufbau mit Sphere-Array aus Sicht der Testkamera, Quelle: Eigene Darstellung.....	38
Abbildung 29: Verbindung der Komponenten im Netzwerk - Eigene Darstellung .....	39

Abbildung 30: Screenshot einer Messung, Lokalisierung bei weißem Rauschen, Quelle: Eigene Darstellung .....	47
Abbildung 31: System-Test, Musiker mit projizierter Kartierung, Quelle: Eigene Darstellung .....	49
Abbildung 32: System-Test, Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Abbildung 33: Umsetzung der Entwicklung 01, Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Abbildung 34: Umsetzung der Entwicklung 02, Quelle: Eigene Darstellung.....	52
Abbildung 35: Umsetzung der Entwicklung 03, Quelle: Eigene Darstellung.....	53
Abbildung 36: Umsetzung der Entwicklung 04, Quelle: Eigene Darstellung.....	53

### 3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Testverfahren .....	39
Tabelle 2: Test 1 .....	41
Tabelle 3: Test 2 .....	43
Tabelle 4: Test 3 .....	44
Tabelle 5: Test 4 .....	45
Tabelle 6: Test 5 .....	46
Tabelle 7: Test 6 .....	48

# 1. Einführung

## 1.1. Motivation

Durch die Gestaltung von Aktionen und dem Design unterschiedlichster Systeme wird die physische, reale Umgebung aktiv verändert und die Wahrnehmung dieser Umgebung beeinflusst <sup>1</sup>. Die Umsetzung von digitaler Information in einem begeh- und begreifbaren Raum, also physische real, ist der Schritt hin zu einer Mixed-Reality, welche Raum und virtuelle Daten miteinander verbindet und somit einen erweiterten Handlungsraum schafft <sup>2</sup>. Inzwischen gibt es Systeme, welche durch die mittels einer Kamera aufgenommene Blickrichtung eines Menschen gesteuert werden oder welche mittels Gesten bedienbar sind <sup>3</sup>. Dabei können computergestützte Darstellungsverfahren Neuer Medien (z.B. virtueller Realitäten) dem Nutzer solcher Systeme direkt sensorische Erfahrungen vermitteln <sup>4</sup>. In diesem Zusammenhang gibt es vielfältige Untersuchungen zu verschiedenen Medien, Interaktivitätsgraden oder Sinnesmodalitäten <sup>5</sup>.

Vor dem Hintergrund der verschiedenen Möglichkeiten, mehrere Sinne durch ein computergestütztes System beeinflussen zu können und somit die Wahrnehmung der realen Umgebung zu verändern, befasst sich diese Arbeit mit der Entwicklung eines Systems, welches die Umwandlung akustischer in visuelle Signale ermöglicht.

## 1.2. Problemstellung

Um akustische Signale visuell erfahrbar zu machen ist ein System notwendig, welches es ermöglicht, akustische Signale aufzunehmen, in visuelle Signale zu transformieren und anschließend grafisch darzustellen. Zusätzlich soll die Möglichkeit bestehen, die grafische Ausgabe zu manipulieren, um die Möglichkeiten der Beeinflussung einer realen Umgebung zu erweitern. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an dieses System (vgl. Kapitel 4.2) muss es in unterschiedliche Komponenten aufgeteilt werden, welche jeweils eigene hard- und softwaretechnischen Ansprüche haben.

Um ein interaktives System zu schaffen welches verschiedene Sinne anspricht und so multimodal wahrnehmbar ist, muss somit im Rahmen dieser Arbeit in einem ersten Schritt ein System entwickelt und auf Funktionalität geprüft werden.

---

<sup>1</sup> Rhee und Marshall 2008, S. 446

<sup>2</sup> Fleischmann und Strauss 2008, S. 15

<sup>3</sup> Heinecke 2012, S. 9

<sup>4</sup> Klimmt et al. 2005, S. 426

<sup>5</sup> Erpenbeck und Sauter 2013, S. 82

## 1.3. Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines interaktiven Systems welches es ermöglicht, akustische Signale visuell erfahrbar zu machen. Kernaspekt der Forschung ist dabei die Entwicklung und anschließende Überprüfung dieses Systems. Die Überprüfung soll zuerst mittels verschiedener Testverfahren bezüglich der grundsätzlichen Funktionalität, und abschließend durch den praxisnahen Einsatz des Systems im Rahmen eines repräsentativen Projekts vollzogen werden.

Dieses Projekt soll Musik visualisieren, womit einerseits ein Schwerpunkt auf eine musikalische (akustische) und andererseits auf eine visuelle Darstellung gelegt wird. Dabei soll die Musik über das interaktive System mittels mehrerer Sinne (Hör- und Sehsinn) erfahrbar sein. Zusätzlich soll dabei eine Manipulation der Wahrnehmung stattfinden, da die akustischen Signale die visuelle Darstellung direkt steuern und so die Aufmerksamkeit des Betrachters verändert wird, da Schall sichtbar gemacht wird.

Im Rahmen der Entwicklung des Systems sowie durch dessen Einsatz innerhalb des oben genannten Projektes ergeben sich dabei folgende Forschungsfragen:

- Inwiefern ist es möglich, visuelle Signale durch akustische Signale direkt zu steuern?
- In welcher Form können akustische Signale visuell dargestellt werden?
- Welche technischen Voraussetzungen muss das System dafür erfüllen und welche Einschränkungen weisen diesbezügliche Systeme auf?
- Für welche Anwendungsbereiche können derartige Systeme interessant sein?

## 1.4. Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 dieser Arbeit befasst sich mit für diese Forschung relevanten theoretischen Hintergründen aus dem Bereich der Wahrnehmungspsychologie (s. Kapitel 2.1). Dies umfasst u.a. Schall und die menschliche Schallwahrnehmung (s. Kapitel 2.1.1) sowie den Sehsinn (s. Kapitel 2.1.3). Außerdem werden Sinnesmodalitäten näher erläutert (s. Kapitel 2.1.4) und die multimodale Erfahrung in den Kontext medialer Produkte gesetzt (s. Kapitel 2.2). In Kapitel 3 werden verschiedene Methoden der Visualisierung akustischer Ereignisse behandelt, hinsichtlich der Bedeutung für diese Arbeit genauer betrachtet (s. Kapitel 3.1) und die Akustische Kamera der gfa i tec. GmbH als ein beispielhaftes System der Schallvisualisierung näher erläutert (s. Kapitel 3.4). Vor diesem Hintergrund wird in Kapitel 4 ein Live-System zur Transformation akustischer in visuelle Signale entwickelt und durch verschiedene Testverfahren hinsichtlich bestimmter Kriterien überprüft (s. Kapitel 4.4). Anschließend wird der Einsatz des entwickelten Systems in einem musikalisch-visuellen Projekt in Kapitel 5 dokumentiert. In einer Zusammenfassung der Ergebnisse (s. Kapitel 6) werden abschließend die Fragen der Forschung geklärt und in

einem Ausblick (s. Kapitel 7) zukünftige Möglichkeiten im Umgang mit Systemen zur Transformation akustischer in visuelle Signale aufgezeigt.

## 2. Hintergründe

### 2.1. Wahrnehmungspsychologie

Die Wahrnehmung beschreibt nach Raab <sup>6</sup> die Aufnahme von körperfremden physikalischen oder chemischen Reizen und deren Umwandlung in körpereigene physiologische Reize mittels der Sinneszellen. Es existieren jedoch verschiedene Ansätze die Wahrnehmung zu definieren. Ein Ansatz aus der Philosophie beschreibt die Art und Weise, in welcher die menschliche Erfahrung die Wahrnehmung der Außenwelt formt, während ein physiologischer Ansatz hingegen die Art und Weise betont in welcher die menschliche Erfahrung durch die Außenwelt geformt wird <sup>7</sup>. Jedoch wird die Wahrnehmung nach Goldstein <sup>8</sup> nicht nur durch eine Abfolge physiologischer Schritte bestimmt, sondern auch durch kognitive Prozesse wie Denken oder Erinnern. Demnach ist die Wahrnehmung u.a. abhängig von den physischen Merkmalen des wahrgenommenen Objektes, den biologisch sensorischen Fähigkeiten des Menschen und von dessen Motivation oder emotionalem Zustand, weshalb Wahrnehmung als subjektiv beschrieben werden kann <sup>9</sup>.

Dieser Beschreibung der Wahrnehmung entspricht auch die Darlegung nach Raab <sup>10</sup>, wonach die Subjektivität der Wahrnehmung durch das menschliche Informationssystem begründet wird, welches mittels der Sinnesorgane nur selektierte Informationen aus einer Vielzahl von Informationen aufnimmt. Als Konsequenz entspricht die menschliche Wahrnehmung keinem Abbild der Realität, sondern ist verschiedensten verfälschenden Faktoren ausgeliefert. <sup>11</sup>

Zusätzlich wird die menschliche Wahrnehmung durch Erfahrungen beeinflusst, also durch das menschliche Gedächtnis, welches auf unterschiedliche, bereits erlebte Sinneseindrücke (riechen, hören, schmecken) beim Interpretieren neuer Erfahrungswerte zurückgreift. Zwangsläufig beeinflussen somit vergangene Erfahrungen die Wahrnehmung neuer Situationen. Aus diesem Grund sind es nicht die Sinnesreize alleine, welche ein Verständnis

---

<sup>6</sup> Raab et al. 2016, S. 188

<sup>7</sup> Rhee und Marshall 2008, S. 446

<sup>8</sup> Goldstein 2001

<sup>9</sup> Rhee und Marshall 2008, S. 445

<sup>10</sup> Raab et al. 2016, S. 188

<sup>11</sup> Raab et al. 2016, S. 188

der menschlichen Umgebung vermitteln sondern die Wahrnehmung, welche über die Informationsaufnahme durch Sinnesreize hinausgeht. (ebd.)

Sinnesreize, bzw. Reize, sind die Voraussetzung für die Aufnahme physikalischer oder chemischer Signale in das Wahrnehmungssystem <sup>12</sup>, wodurch bestimmte Empfindungen ausgelöst werden können, welche in ihrer Intensität von der Stärke der empfangenen Reize abhängen <sup>13</sup>. Betrachtet man unter dem Aspekt der Wahrnehmung Design, kann man dieses nach Rhee und Marshall <sup>14</sup> als „Akt der Organisation [...] sensorischer Information“ verstehen und somit als „Artikulation der Wahrnehmung“.

### **2.1.1. Schall und Methoden der menschlichen Schallwahrnehmung**

Unter Schall versteht man (longitudinale) Schwingungen, welche sich wellenförmig in einem Trägermedium wie zum Beispiel der Luft (Luftschall) ausbreiten <sup>15</sup>. Neben der Schallwellenausbreitung in Gasen (z.B. Luft) kann sich Schall auch in anderen Trägermedien ausbreiten, hierzu gehören verschiedene Feststoffe (Körperschall) ebenso wie Flüssigkeiten (ebd.).

Je größer die u.a. temperaturabhängige Elastizität des Ausbreitungsmediums, desto besser ist die Fähigkeit des Schalls sich auszubreiten. Ist eine Schallquelle ungerichtet, breitet sich der Schall in seiner ursprünglichen Form, das heißt durch Kugelwellen gleichmäßig in alle Richtungen aus, wobei es durch die wellenförmige Schallausbreitung zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen (Addition bzw. Subtraktion der Amplituden verschiedener Schallwellen) kommen kann. <sup>16</sup>

Die Abweichung der statischen Dichte  $p_0$  des Ausbreitungsmediums (z.B. Luft), welche durch die lokale Verdichtung bedingte Abweichung  $p_{\sim}$  entsteht, bezeichnet man als Schalldruck  $p$  <sup>17</sup>. Dieser wird in Pascal (Pa, 1 Pa = 1 Newton / Quadratmeter) gemessen, ist ortsabhängig, wird bei verdoppelter Entfernung zur Schallquelle um die Hälfte geringer und ist aufgrund seiner Wellenform (Schwingung) nicht konstant <sup>18</sup>. Um die Wechselgröße (Schalldruck) anzugeben lässt sich der Effektivwert verwenden, welcher als Maß für die Leistung der Wechselgröße einen quadratischen zeitlichen Mittelwert (root mean square, RMS) angibt <sup>19</sup>. Da die menschliche Wahrnehmung des Schalls bezüglich dessen Reizverstärkung nicht linear, sondern logarithmisch ist, werden Differenzen des

---

<sup>12</sup> Goldstein 2001

<sup>13</sup> Raab et al. 2016, S. 188

<sup>14</sup> Rhee und Marshall 2008, S. 446

<sup>15</sup> Friedrich 2008, S. 7

<sup>16</sup> Raffaseder 2010, S. 86–92

<sup>17</sup> Weinzierl 2008, S. 20

<sup>18</sup> Friedrich 2008, S. 11

<sup>19</sup> Weinzierl 2008, S. 11

Schalldrucks durch ein logarithmisches Verhältnismaß, den Schalldruckpegel  $L_p$  gemessen. Dieser stellt das Verhältnis des zu bewertenden Schalldrucks  $p$  zur Hörschwelle  $p_0$  (absoluter Schalldruckpegel) dar und wird in  $\text{dB}_{\text{SPL}}$  (Dezibel Sound Pressure Level) gemessen, während das Verhältnis (Schalldruckpegel) zweier beliebiger Schalldruckgrößen in dB (Dezibel) gemessen wird. Die Schalldruckgröße, welche bei der Messung des Schalldruckpegels den Referenzwert darstellt, wird dann anstelle der Hörschwelle  $p_0$  eingesetzt <sup>20</sup>.

$$L_p = 20 \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

Reine sinusförmige Schwingungen kommen in der Natur nicht vor, statt dessen gibt es mehrere Formen des Schalls wie zum Beispiel aperiodische, stochastische Vorgänge in unharmonischer Verteilung und mit vielen Frequenzkomponenten (Geräusche) oder eine Mischung aus einzelnen Sinustönen (Klänge). Die Tonhöhe wird dabei durch die Frequenz, also die Schwingungszahl pro Sekunde bestimmt. <sup>21</sup>

Das wahrgenommene Schallereignis ist zusätzlich abhängig von räumlichen Begrenzungen, welche das Schallfeld verändern und durch Reflektion ein wahrgenommenes Hörereignis positiv (z.B. Nachhall: reflektierte Schallwellen addieren sich zu Primäranteilen, d.h. die Lautstärke nimmt zu) oder negativ (z.B. durch einzelne destruktive Interferenzen aufgrund von Reflektionen oder Echos) beeinflussen können <sup>22</sup>. Um diesbezüglichen Faktoren entgegenzuwirken, kann mittels Dämpfung Schallenergie in Wärmeenergie umgewandelt werden, was zu einer Lautstärkereduktion führt <sup>23</sup>. Ein Beispiel hierfür ist die Dämpfung von Schwingungen durch schallweiche Oberflächen <sup>24</sup>.

Um eine Kommunikation mittels Schall zwischen zwei Komponenten zu ermöglichen, ist ein Sender, ein Kanal für die Übertragung und ein Empfänger notwendig, was vereinfacht betrachtet eine Schallquelle, die Luft als Medium der Übertragung und das Ohr des Empfängers sein kann <sup>25 26</sup>. Das Ohr als Teil des auditiven Systems ist für den Hörsinn unabdingbar, welcher als ständige Verbindung zur Außenwelt Emotionen und Empfindungen des Menschen beeinflusst <sup>27</sup>. Im Vergleich zu dem Sehsinn ist der Hörsinn omnipräsent (das Ohr kann man nicht schließen), was bedeutet, dass er konstant an dem Prozess der Wahrnehmung teilnimmt <sup>28</sup> (vgl. Kapitel 2.1). Das biologische System zur

---

<sup>20</sup> Friedrich 2008, S. 11

<sup>21</sup> Römer 1994, S. 15–16

<sup>22</sup> Römer 1994, S. 77–82

<sup>23</sup> Römer 1994, S. 47

<sup>24</sup> Friedrich 2008, S. 233

<sup>25</sup> Raffaseder 2010, S. 53

<sup>26</sup> Weinzierl 2008, S. 1

<sup>27</sup> Hartmann 2012, S. 26

<sup>28</sup> Raffaseder 2010, S. 19

Verarbeitung von Signalen wird dabei nach Weinzierl <sup>29</sup> als auditives System bezeichnet und verfügt u.a. über Möglichkeiten, verschiedene Eingangssignale parallel zu verarbeiten. Die anatomische Aufteilung des menschlichen Ohrs erfolgt dabei in das äußere Ohr, das Mittelohr und das Innenohr <sup>30</sup>. Das menschliche Gehör nimmt allgemein Signale zwischen 20 Hz und 20 kHz (auch Hörfeld genannt) wahr, wobei akustische Signale erst im Ohr registriert, und dann im Gehirn zu einem Höreindruck verarbeitet werden <sup>31 32</sup>. Als Hörschwelle bezeichnet man dabei den Schalldruckpegel, der ein Hörereignis unter ruhigen Umgebungsbedingungen auszulösen vermag <sup>33</sup>.

Das auditive System des Menschen befähigt außerdem, in einer leisen Umgebung mehrere Schallquellen wahrzunehmen, während in einer lauten Umgebung einzelne Schallquellen durch die Erhöhung der Hörschwelle unterdrückt werden (Maskierungseffekt), was die Fokussierung bestimmter akustischer Signale ermöglicht <sup>34 35</sup>. Zusätzlich kann durch den Hörsinn und dessen feinen zeitlichen Orientierungsvermögen, ein Richtungsunterschied von 1 cm oder 3 cm wahrgenommen werden, welcher anhand von Laufzeitdifferenzen zwischen 10 bis 20 µs ermittelt wird <sup>36 37</sup>. Zusätzlich ist eine zentrale Aufgabe des Hörsinns, die Umgebung räumlich wahrzunehmen <sup>38</sup>.

### **2.1.2. Binaurales Hören, Schalllokalisierung und räumliche Schallwahrnehmung**

Durch das auditive System können Menschen Geräusche und Klänge räumlich zuordnen <sup>39</sup>, wobei bei der Zuordnung eines Ortes zu einem Hörereignis der Schall bezüglich bestimmter Merkmale ausgewertet wird.

Diese Merkmale werden generell in zwei Klassen unterteilt, die monauralen und interauralen Ohrsignalmerkmale. Zusätzlich differenziert man (bei Hörversuchen) zwischen einer monotonen, diotischen und dichotischen Beschallung. Die monotone Beschallung ist einohrig, d.h. nur ein Ohr wird beschallt, bei der diotischen Beschallung werden beide Ohren identisch beschallt und bei einer dichotischen Beschallung der Ohren werden diese „getrennt-ohrig“, also unterschiedlich, beschallt. <sup>40</sup>

---

<sup>29</sup> Weinzierl 2008, S. 89

<sup>30</sup> Weinzierl 2008, S. 42–44

<sup>31</sup> Römer 1994, S. 33–35

<sup>32</sup> Weinzierl 2008, S. 55

<sup>33</sup> Weinzierl 2008, S. 53

<sup>34</sup> Raffaseder 2010, S. 111–112

<sup>35</sup> Raffaseder 2010, S. 19

<sup>36</sup> Weinzierl 2008, S. 58

<sup>37</sup> Dudek 2007, S. 28

<sup>38</sup> Raffaseder 2010, S. 20

<sup>39</sup> Gundlach 2013, S. 192

<sup>40</sup> Weinzierl 2008, S. 88

Schönhammer <sup>41</sup> definiert zusätzlich den Vergleich von Reizen mit beiden Ohren als binaural, während er von monauralen Faktoren hinsichtlich der richtungsabhängigen und entfernungsabhängigen Variation bei der Zusammensetzung des Schalls spricht. Binaurales Hören bei Säugetieren wird auch als interaural time difference (ITD) bezeichnet und ist eine Voraussetzung für das Lokalisieren von Schallquellen <sup>42</sup>. Bei dem binauralen Hören laufen wahrgenommene akustische Signale beider Ohren in der Gehörreaktion des Gehirnstammes zusammen, wo die wahrgenommenen akustischen Signale zu einer binauralen Repräsentation zusammengefügt werden <sup>43</sup>. Beim Richtungshören wird außerdem deutlich, dass das Gehör, wie bereits erwähnt (vgl. Kapitel 2.1.1), fähig ist, Laufzeitdifferenzen zu nutzen, um zum Beispiel bei der Wahrnehmung von Sprache, schnelle Veränderungen von wenigen Millisekunden des Amplitudenverlaufs zu registrieren <sup>44</sup>. Zusätzlich ist die richtungsabhängige Lautheit bei der Wahrnehmung von Schallquellen von Bedeutung. Durch die Transformation des akustischen Signals zwischen zwei Komponenten (von der Schallquelle zu den Ohren) sowie die binaurale Summation lässt sich die richtungsabhängige Lautheit durch zwei Prozesse auffassen. Die Transformation des Signals ist dabei ein rein physikalischer Prozess, welcher den Druckaufbau an dem der Schallquelle zugewandten Ohr, sowie die Abschattung von dem Schall durch den Kopfschatten an dem der Schallquelle abgewandten Ohr umfasst. Man spricht in diesem Zusammenhang, wie im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher dargelegt, auch von der kopfbezogenen Übertragungsfunktion (Head-Related Transfer Functions). Die binaurale Lautheitssummation ist ein psychophysischer Prozess und beschreibt die Kombination von „richtungsabhängig wechselnden am-Ohr-Pegel“ zu einem einzigen „binauralen Lautheitseindruck“. <sup>45</sup> Zusätzlich ist die binaurale Hörschwelle um etwa 3dB niedriger als die monaurale <sup>46</sup>. Head-Related Transfer Functions (HRTFs) oder Außenohr-Übertragungsfunktionen sind spezielle Übertragungsfunktionen, welche spektrale Veränderungen des Schalls innerhalb der Übertragungskette mathematisch beschreiben <sup>47</sup>. Aufgrund des menschlichen Körperbaus (Kopf) werden Schallquellen spezifisch, in Abhängigkeit von der relativen Position der Schallquelle zu den Ohren, frequenziell verzerrt, was die Wahrnehmung richtungsabhängiger Lautheit oder räumlicher Dimensionen ermöglicht <sup>48</sup>.

Um eine Schallquelle zu lokalisieren werden außerdem Peilbewegungen des Kopfes eingesetzt, da sich Signale in spezifischer Weise ändern (frequenzielle Verzerrung), wenn

---

<sup>41</sup> Schönhammer 2013, S. 222–223

<sup>42</sup> McAlpine 2005, S. 21

<sup>43</sup> McAlpine 2005, S. 21

<sup>44</sup> Weinzierl 2008, S. 58

<sup>45</sup> Weinzierl 2008, S. 62

<sup>46</sup> Weinzierl 2008, S. 61

<sup>47</sup> Weinzierl 2008, S. 90

<sup>48</sup> Weinzierl 2008, S. 90

sich die relative Haltung des Kopfes zur Schallquelle verändert <sup>49</sup>. Zu bemerken ist jedoch, dass Hörereignisse nicht ausschließlich durch Informationen des Hörsinns, sondern vielmehr auch mittels Informationen anderer Sinne gebildet werden (ebd.).

### **2.1.3. Sehen**

Die optischen Prinzipien des Sehens beschreiben Vorgänge, bei welchen Licht durch die Linse des Auges auf die Netzhaut fällt, auf welche eine Abbildung der Außenwelt projiziert wird. Biologisch betrachtet werden dabei Lichtreize mittels Zapfen und Stäbchen in neuronale Reize umgewandelt. <sup>50</sup>

Dabei ist das Sehen ein komplexer Vorgang, welcher auch kognitive Prozesse umfasst und durch ein kontrollierbares, bewusst bewegbares System (Augen) ausgeführt wird <sup>51</sup>. Die visuelle Wahrnehmung beschränkt sich dabei nicht nur auf das Auge. Die Organisation von Information als zentrales Element des Sehens findet beispielsweise durch Interpretation, vergleichen oder prüfen im Gehirn statt <sup>52</sup>. Auch wenn generell der visuelle Sinn dominiert <sup>53</sup>, wird das Auge, vor allem beim Anblick immer gleicher Bilder, schnell müde <sup>54</sup>. Um Einzelbilder visuell wahrzunehmen, müssen sie für das menschliche Auge mindestens 50 ms lang zu sehen sein, denn ab 20 Bildern pro Sekunde verschwimmen einzelne Aufnahmen durch die menschliche Wahrnehmung zu Sequenzen von Bewegtbildern <sup>55</sup>.

Dabei werden beispielsweise nacheinander auftretende, punktuelle Lichtreize als eine Scheinbewegung bzw. „stroboskopische Bewegung“, wahrgenommen. Dieser Effekt ist einerseits abhängig von der Frequenz der einzelnen, aufeinander folgenden Lichtreize und andererseits von deren räumlichen Abstand zueinander. <sup>56</sup>

Instinktiv ist das Auge darauf ausgelegt, jeder Bewegung innerhalb des Blickfeldes zu folgen wobei gilt: je schneller die Bewegung, desto mehr wird der Blick davon angezogen und desto größer ist die Aufmerksamkeit, die der Betrachter einem Objekt entgegenbringt <sup>57</sup>.

---

<sup>49</sup> Weinzierl 2008, S. 88

<sup>50</sup> Wentura und Frings 2013, S. 58–59

<sup>51</sup> Haug 2012, S. 31–32

<sup>52</sup> Schnell 2000, S. 13

<sup>53</sup> Giard und Peronnet 1999, S. 475

<sup>54</sup> Gundlach 2013, S. 190

<sup>55</sup> Dudek 2007, S. 28

<sup>56</sup> Goldstein 2001, S. 269–272

<sup>57</sup> Gundlach 2013, S. 190

#### 2.1.4. Sinnesmodalität

Informationen für die Bildung von Hörereignissen werden, neben dem Gehör, auch über andere Sinne wie dem Sehsinn oder dem Tastsinn gewonnen <sup>58</sup>. Menschen hören dann allgemein gut, wenn sie die Schallquelle sehen können <sup>59</sup>, wobei andere Sinneswahrnehmungen wiederum von der schnellen Wahrnehmung von Hörereignissen profitieren <sup>60</sup>. Neben der dadurch erklärbaren starken Kopplung von Auge und Ohr <sup>61</sup> stehen auch andere Sinne miteinander in enger Verbindung.

Allgemein werden Ereignisse durch (verschiedene) Sinnesreize gebildet, welche zeitgleich wahrgenommen und in Beziehung zueinander gesetzt werden. Durch den Vergleich der eingehenden Reize mit bereits vorhandener Erfahrung, kann die Umwelt durch das Ergänzen fehlender Information erschlossen werden. <sup>62</sup>

Diese assoziative Verknüpfungen von Sinnesreizen mit Erinnerungen werden durch das sog. affektive Gedächtnis ermöglicht, durch das Erleben von Sinnesreizen auf emotionaler Ebene <sup>63 64</sup>. Verschiedene Aspekte des Zusammenwirkens einzelner Sinnesmodalitäten sind dem Forschungsgebiet der Multisensorischen Integration zuzuordnen <sup>65</sup>. Giard und Peronnet <sup>66</sup> zeigen dabei, dass Prozesse der multisensorischen Integration Teil eines sehr anpassungsfähigen Systems sind, welches sich dynamisch an individuelle sensorische und kognitive Fähigkeiten anpasst.

## 2.2. Multimodale Erfahrung im medialen Kontext

Bei der Entwicklung verschiedenster medialer Produkte ist es von Vorteil, mehrere Ebenen der Wahrnehmung anzusprechen, das heißt den Erfolg des Produktes durch eine gemeinsame Stimulation mehrerer Sinnesorgane zu begünstigen <sup>67</sup>. Dies kann Produkte aus dem Bereich der Neuen Medien <sup>68</sup>, ebenso die Kommunikation von Marken <sup>69</sup> oder multimediale Lernkonzepte <sup>70</sup> betreffen.

---

<sup>58</sup> Weinzierl 2008, S. 88

<sup>59</sup> Dudek 2007, S. 30

<sup>60</sup> Dudek 2007, S. 28

<sup>61</sup> Dudek 2007, S. 28

<sup>62</sup> Raffaseder 2010, S. 274

<sup>63</sup> Raffaseder 2010, S. 276

<sup>64</sup> Raffaseder 2010, S. 18

<sup>65</sup> Effenberg und Alfred O. 2007, S. 190

<sup>66</sup> Giard und Peronnet 1999, S. 486

<sup>67</sup> Raffaseder 2010, S. 18–19

<sup>68</sup> Klimmt et al. 2005, S. 425

<sup>69</sup> Roth 2005, IX

<sup>70</sup> Maske 2012, S. 194

Neue Medien wie zum Beispiel Medien aus dem Bereich der Virtuellen Realität können so nach Klimmt et al. <sup>71</sup> ein realistisches Abbild der realen Welt durch die Ansprache verschiedener Sinneskanäle vermitteln. Dies wird mittels computergestützter Darstellungsverfahren ermöglicht, welche einerseits sensorische Erfahrungen an den Benutzer des Systems übermitteln und andererseits mehrere Sinne wie den Seh- Hör- oder Tastsinn in einer realistischen Synchronisation multimodal ansprechen können. <sup>72</sup>

Bei der Bildung von Marken spielen verschiedene kommunikative Maßnahmen eine wichtige Rolle, zu welchen neben unterschiedlichen Kommunikationsebenen auch das bewusste Ansprechen verschiedener Sinne gehört <sup>73</sup>. Durch die Kommunikation wird ein Eindruck des wahrzunehmenden Objektes bzw. der Marke vermittelt, welcher sich für den Empfänger aus verschiedenen Sinneseindrücken (z.B. Texte, Bilder, Gerüche, tastbare Eindrücke oder akustische Ereignisse) zusammensetzt <sup>74</sup>.

Hinsichtlich kognitivistischer Lernkonzepte, vor allem aus dem Softwarebereich, werden nach Maske <sup>75</sup> Konzepte bevorzugt, welche verschiedenste Sinnesmodalitäten zur Unterstützung des Lernerfolges ansprechen. Wenn dabei einerseits verschiedene Medien technisch kombiniert werden und andererseits verschiedene Sinnesmodalitäten des Lernenden gleichzeitig angesprochen werden, spricht man dabei nach Maske <sup>76</sup> von Multimedialität.

### 3. Visualisierung von Audiosignalen

Der Begriff "Visualisierung" lässt sich einerseits bezüglich der Wahrnehmung visueller Information, also dem Sehen, und andererseits hinsichtlich der Gestaltung von Information definieren. Diese Erklärungen sind zwar thematisch miteinander verknüpft, beschreiben jedoch zwei unterschiedliche Prozesse. <sup>77</sup>

Nachfolgend soll die Visualisierung von Information als Akt der Gestaltung erläutert werden, wobei der Schwerpunkt auf den sog. Visuals (s. Kapitel 3.1) als eine Möglichkeit der Visualisierung von Information (z.B. Musik) sowie auf Projektoren als eine mögliche Technik der Visualisierung, liegt. Der Grund für diesen thematischen Schwerpunkt ist dessen Relevanz für die im weiteren Verlauf der Arbeit dargelegte Entwicklung eines audiovisuellen Systems.

---

<sup>71</sup> Klimmt et al. 2005, S. 425

<sup>72</sup> Klimmt et al. 2005, S. 426

<sup>73</sup> Roth 2005, S. 6

<sup>74</sup> Roth 2005, S. 1–2

<sup>75</sup> Maske 2012, S. 194

<sup>76</sup> Maske 2012, S. 192

<sup>77</sup> Erhoff und Marshall 2008, S. 439–440

### 3.1. Visualisierung durch VJing

Eine mögliche Form der Visualisierung von Musik ist das VJing. Dabei mixt ein Visual Jockey (VJ) Bilder in Echtzeit und spontan als rhythmische Reaktion auf Musik, welche dann zum Beispiel mittels eines Projektors auf eine Bildebene projiziert werden.<sup>78</sup>

Somit ist VJing eine Form der Präsentation und Gestaltung von Bildinhalten wie zum Beispiel Filmsequenzen, Fotos, 3D-Animationen oder eine Kombination daraus. Bei einer Live-Performance hat der VJ die Möglichkeit, mit seinen Bildinhalten auf Umgebungsumstände einzugehen. Da Visuals meist in dunklen Umgebungen präsentiert werden, haben Helligkeit und Farben der Bildinhalte besonderen Einfluss, da der Raum durch die Präsentation beleuchtet wird.<sup>79</sup>

Zusätzlich findet die Auswahl und Wiedergabe der Inhalte in Echtzeit statt, wobei verschiedene Parameter manuell auf die medialen Inhalte angewandt werden können. Dazu gehört zum Beispiel die Möglichkeit, Inhalte in Loops (Schleifen) wiederholt abzuspielen oder die Farbwiedergabe und Geschwindigkeit während dem Abspielen zu manipulieren.<sup>80 81</sup>

Heutzutage ist VJing eine international verbreitete Kunstform und findet Anwendung in verschiedensten kulturellen Bereichen wie beispielsweise Konzerten, Museen oder Kunstausstellungen, hauptsächlich jedoch in Clubs und Discos des Nachtlebens. Beeinflusst werden die VJing-Künstler hauptsächlich durch die sich immer weiterentwickelnde elektronische Musik. Die parallele Verbesserung der Computertechnik, wie leistungsfähigere Grafikkarten und Prozessoren, geben den Künstlern immer mehr Möglichkeiten, neue künstlerische Ausdrucksformen in Echtzeit anzuwenden und Wege, die modernen hybriden Medienformate miteinzubeziehen.<sup>82</sup>

### 3.2. Projektion als Möglichkeit der Visualisierung

Bei einer Projektion wird eine zweidimensionale Vorlage mittels eines optischen Instrumentes (Projektionsapparat mit optischer Einheit) gegebenenfalls skaliert auf eine Bildebene projiziert. Zwischen den verschiedenen Typen von Projektoren wird dabei nach der Art wie die Projektionsfläche beleuchtet wird, zwischen aktiv und passiv unterschieden. Wird ein transparentes Objekt (Bild) mit einer Lichtquelle durchleuchtet, spricht man von

---

<sup>78</sup> Scheel 2009, S. 287–288

<sup>79</sup> Engström et al. 2008, S. 1

<sup>80</sup> Vaucelle und Ishii 2007, S. 1

<sup>81</sup> Engström et al. 2008, S. 1

<sup>82</sup> Engström et al. 2008, S. 1

einer passiven Projektion, da die Bildvorlage als Lichtventil bezeichnet werden kann. Bei der aktiven Bilderzeugung hingegen, wird das Bild als Lichtquelle verwendet und über eine optische Einheit projiziert (z.B. Kathodenstrahler) oder mittels Laserstrahlen (z.B. Laser-Projektor) auf der Bildebene erzeugt.<sup>83 84 85</sup>

Bei der Projektion selbst sind vor allem die Lichtverhältnisse der Umgebung von Wichtigkeit. Findet die Projektion beispielsweise bei einer großen Umgebungslichtstärke statt, muss der Projektor eine große Helligkeit aufweisen, während in einer dunklen Umgebung vor allem ein geringer Schwarzwert erwünscht ist.<sup>86</sup>

Die Helligkeit von Projektoren wird dabei in Lichtstrom (Lumen) gemessen, da dieser Wert kaum von der Größe der projizierten Fläche abhängt<sup>87</sup>. Der maximale relative Helligkeitsunterschied zwischen Schwarz und Weiß wird hingegen durch das Kontrastverhältnis beschrieben, während perspektivische Verzerrungen, ähnlich wie bei Kameras, durch einen Lensshift optisch korrigiert werden können<sup>88</sup>. Dabei müssen Projektoren, jedes Mal wenn sich die Umgebung oder Distanz zu der Projektionsfläche ändert, kalibriert werden<sup>89 90</sup>. Neben den bereits erwähnten Typen von Projektoren gibt es verschiedenste Modelle, welche unterschiedlichste Technik zur Projektion nutzen. Micro-Projektoren und Pico-Projektoren zum Beispiel werden immer häufiger eigenständig oder eingebettet in verschiedene Anwendungen eingesetzt<sup>91</sup>. Sie zeichnen sich durch ihre geringe Größe aus, wie zum Beispiel der Pico-Projektor PicoP der Firma MicroVision, welcher mit nur 8 mm Dicke mit einer Auflösung von 1366x1024 Pixeln projiziert<sup>92</sup>. Laserprojektoren hingegen arbeiten auf der Basis von LCD oder DMD Lasern und verwenden stark gebündelte, rote, grüne und blaue Lichtstrahlen, um direkt Bilder aus Lichtstrahlen zu erzeugen<sup>93</sup>.

### 3.3. Geschichte der Projektion

Die Geschichte der Projektion erstreckt sich über mehrere Jahrhunderte, wenn auch die Bedeutung der Bühnenprojektion und deren allgemeine Anwendung erst mit der Einführung des elektrischen Lichts gelang. Als erster Projektionsapparat gilt die

---

<sup>83</sup> Spektrum der Wissenschaft 1998

<sup>84</sup> Schmidt 2005 // 2013, S. 497–498

<sup>85</sup> Schmidt 2005 // 2013, S. 495

<sup>86</sup> Schmidt 2005 // 2013, S. 505

<sup>87</sup> Hartmann 2012, S. 163

<sup>88</sup> Hartmann 2012, S. 162

<sup>89</sup> van Krevelen, D. W. F. und Poelman 2010, S. 4

<sup>90</sup> Brown et al. 2005, S. 193

<sup>91</sup> Essaïan und Khaydarov 2012, S. 400

<sup>92</sup> van Krevelen, D. W. F. und Poelman 2010, S. 5

<sup>93</sup> Schmidt 2005 // 2013, S. 469

"Laterna Magica", welche mithilfe einer Lichtquelle transparente Bilder projizierte. Bereits zu Beginn des 14. Jahrhunderts wird die "Camera Obscura" beschrieben, welche als direkter Weg zum Fotoapparat gilt, und das inverse Prinzip darstellt. Einzig die Sammellinse als Projektionsoptik in der Laterna Magica unterscheidet die beiden Apparate in ihrem Strahlengang. <sup>94</sup>

Zwar erlangte die Laterna Magica bereits Ende des 18. Jahrhunderts zur Volksbelustigung auf Jahrmärkten, große Beliebtheit. Jedoch reichten die zur Verfügung stehenden Lichtquellen bis Anfang des 19. Jahrhunderts nicht aus, um mit ihr bei aktiver Bühnenbeleuchtung Bilder zu erzeugen. <sup>95</sup>

Erst mit der Einführung des elektrischen Lichts gewann die projizierte Bühnenanwendung an Bedeutung, wenn auch verschiedene lichttechnische Forderungen erst im Zuge der Weiterentwicklung der Projektoren erfüllt wurden. <sup>96</sup>

Um den immer anspruchsvolleren Bühnenbildern und Inszenierungen gerecht zu werden, wurde im Zuge der Elektrifizierung der Lichtquellen auch die Konstruktion der Apparaturen immer aufwändiger. Die schon in den Anfängen der Projektion verwendeten Effektscheiben für bewegte Darstellungen, bei welchen die Darstellung auf mehrere Glasplatten gemalt und somit beweglich war, wurden durch elektrische Effekte erweitert. So konstruierte der Beleuchtungstechniker und Projektionskünstler Hugo Bähr um 1870 die ersten sog. "Bährschen Effektapparate", wo mithilfe von Bogenlampen um elektrisch bewegbaren Scheiben beispielsweise ziehende Wolken, Regen oder Flammen darstellbar waren. Diese Technik wird bis heute in sogenannten Gobo-Scheinwerfern verwendet. <sup>97</sup>

### 3.4. Schall-Visualisierung

Schall kann nicht nur auditiv, sondern auch durch optische Reize erfahrbar gemacht werden. Ein Beispiel hierfür wird nachfolgend anhand der Akustischen Kamera erklärt. Die Akustische Kamera ist eine Entwicklung der *Gesellschaft für angewandte Informatik* (GFaI e.V.) und ermöglicht die visuelle Darstellung von Schall.

Die nachfolgenden Erläuterungen bezüglich der Akustischen Kamera sind der Internetseite der Firma gfai tech GmbH <sup>98</sup> (Tochtergesellschaft der GFaI e.V.) und einer online-Produktbeschreibung entnommen. Zusätzlich wurden diese Informationen durch Wissen des Autors ergänzt, welches in einer Schulung der Firma gfai tech GmbH, durch Herrn

---

<sup>94</sup> Mildenerger 1961, S. 3–4

<sup>95</sup> Mildenerger 1961, S. 8–10

<sup>96</sup> Mildenerger 1961, S. 49

<sup>97</sup> Mildenerger 1961, S. 72–74

<sup>98</sup> Gfai tech GmbH 2016

Michael Kerscher <sup>99</sup> zur Einweisung in die Bedienung der Akustischen Kamera erworben wurde. Die Literaturquelle vermerkt dabei den Vortragenden des Schulungsinhaltes sowie die Firma *gfai tech GmbH* als Institution der Schulung und entspricht dem Typ „persönliche Mitteilung“. Ein Nachweis über die Teilnahme an der Schulung ist im Anhang aufgeführt (s. Kapitel 9.1).

### **3.4.1. Akustische Kamera**

Der Produktbeschreibung der Akustischen Kamera ist zu entnehmen, dass diese ein Mess-System zur Lokalisation von Schallemissionen ist. Die Besonderheit des Systems liegt darin, dass nicht nur der Druck des Schalls gemessen, sondern eine visuelle Schall-Karte erstellt wird. Ähnlich wie der Bild-Sensor einer herkömmlichen Kamera das reflektierende Licht bestimmter Punkte eines Objekts misst, registriert die Akustische Kamera den punktuellen Schalldruck eines emittierenden Objektes und erstellt eine Kartierung des Schalls, die den Bildern einer Wärmebildkamera optisch ähnelt. <sup>100</sup>

Zur Detektion der Schallquellen werden Mikrofon-Arrays verwendet. Diese bestehen aus Karbonfaser-Konstruktionen in unterschiedlichen Geometrien mit 48-168 integrierten Mikrofonkapseln (s. Seite 19). Zusätzlich befindet sich in allen Arrays eine justierte Kamera, um die ermittelte Schall-Karte über das Kamera-Bild zu legen und so die Schallemission dem emittierenden Objekt zuordnen zu können. <sup>101</sup>

#### ***Aufbau der Akustischen Kamera***

Das Mess-System *Akustische Kamera* besteht laut Kerscher <sup>102</sup> im wesentlichen aus drei Komponenten (s. Abbildung 1):

- Mikrofon-Array
- Datenrekorder
- Computer mit Analyse-Software

---

<sup>99</sup> Kerscher 2016

<sup>100</sup> Gfai tech GmbH 2015, S. 4

<sup>101</sup> Gfai tech GmbH 2015, S. 5

<sup>102</sup> Kerscher 2016

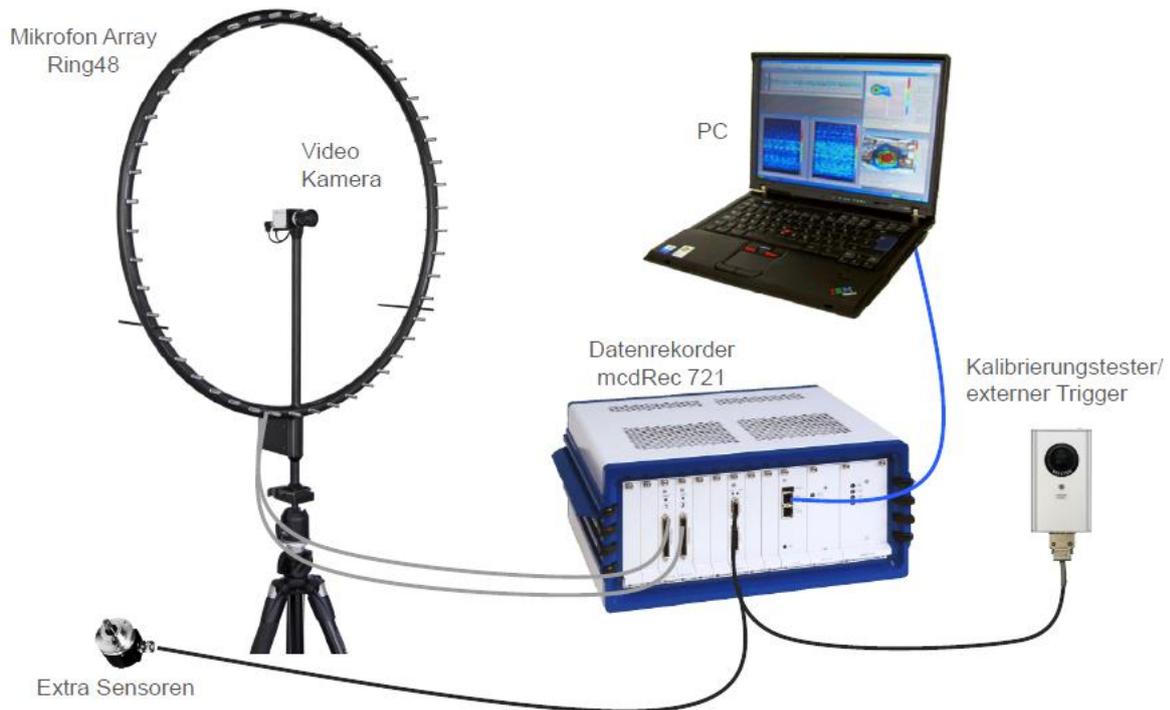


Abbildung 1: Verbindungen der Akustischen Kamera, Quelle: gfai tech GmbH

Um die Messergebnisse zu präzisieren können zusätzlich weitere Sensoren wie Beschleunigungs-, Drehzahl- oder Schwingungsmesser angeschlossen werden, sowie eine Fernauslösesteuerung welche auch als Kalibrierungseinheit eingesetzt wird.

### **Funktionsweise**

Wird eine Schallemission gemessen, registrieren die Mikrofone des Arrays den Schalldruck. Die elektrischen Signale des Mikrofon-Arrays werden an den Datenrekorder weitergeleitet und in digitale Signale umgewandelt. Die Analyse-Software *Noise Image* wertet diese Signale aus und erstellt daraus ein Bild des Schalls. Genauer wird die Funktionsweise der Akustischen Kamera von der Firma gfai tech GmbH <sup>103</sup> wie folgt beschrieben:

Um den Schalldruck eines Messpunkts zu ermitteln wird eine Messebene definiert. Bei dieser Definition werden in der Analyse-Software die Lufttemperatur und der Abstand der Messebene zum Array angegeben um die Schallgeschwindigkeit und dessen Laufzeit zu ermitteln. Diese Ebene wird in beliebig viele Messpunkte gerastert, welche fokussiert werden sollen. (ebd.)

<sup>103</sup> Gfai tech GmbH 2016

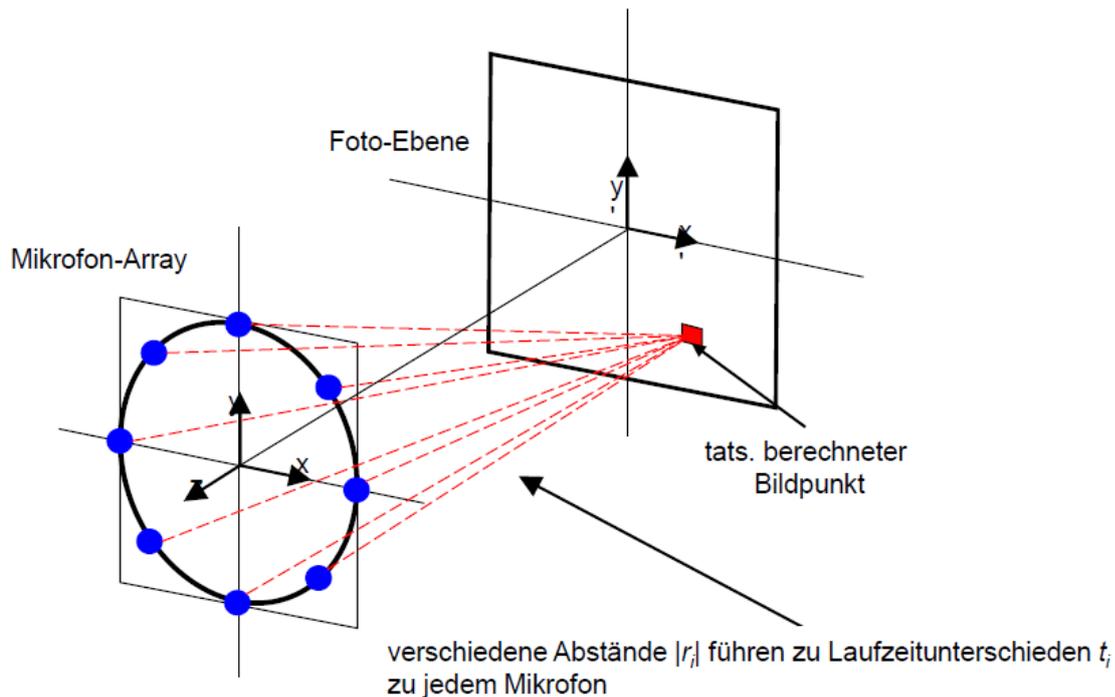


Abbildung 2: Lokalisierungsprinzip der Akustischen Kamera, Quelle: gfai tech GmbH

Das Lokalisierungsprinzip der Akustischen Kamera, also die Ermittlung des Schalldruckpegels eines Messpunktes, ist das „Delay-and-Sum-Beamforming“:

- $P$  = lokaler Schalldruck
- $t$  = Laufzeit
- $r$  = Abstand
- $N$  = Summe der Mikrofone
- $p$  = gemessener Schalldruck
- $\Delta$  = Laufzeitdifferenz

$$P(t, \vec{r}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p(t - \Delta_i(\vec{r}))$$

Abbildung 3: Sum-and-Beamforming-Formel, Quelle: gfai tech GmbH

Der Beamforming-Prozess wird sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich angewandt und kann laut gfai tech GmbH <sup>104</sup> durch die schrittweise Betrachtung des Signalfusses der Akustischen Kamera näher beschrieben werden. Im folgenden Signalfussdiagramm (Abbildung 4) befinden sich zwei Schallquellen (Source 1, Source 2) auf der Messebene, wobei der fokussierte Messpunkt bei *Source 1* liegt:

<sup>104</sup> Gfai tech GmbH 2016

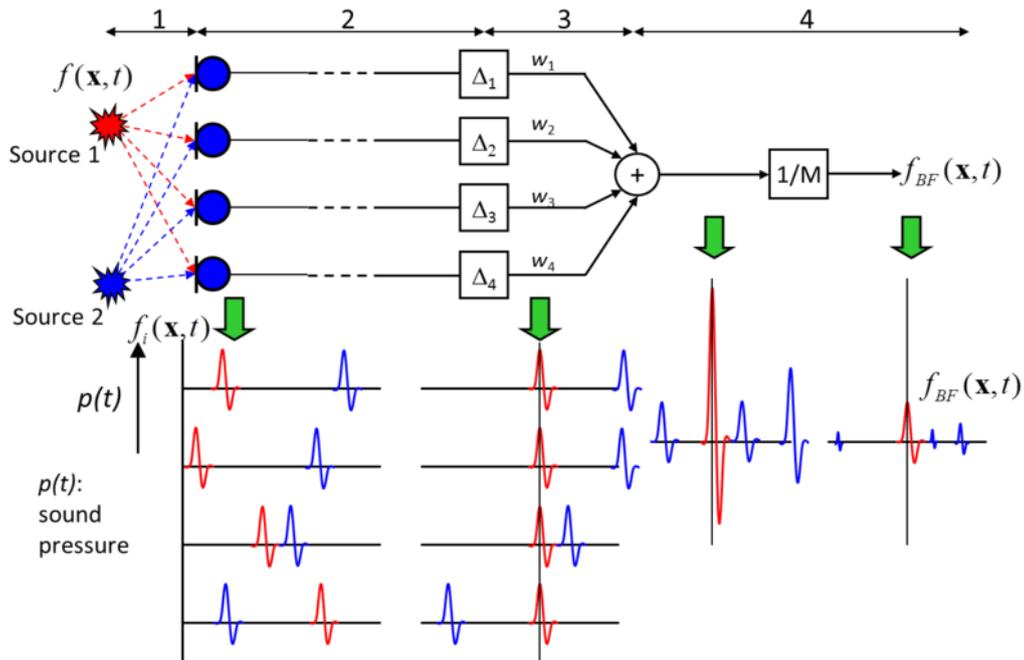


Abbildung 4: Beispielhafter Signalfluss des Beamforming-Prozesses im Zeitbereich, Quelle: gfaitech GmbH

1. Durch die unterschiedlich langen Wege des Schalls zu den Mikrofonen entstehen Laufzeitunterschiede (s. Abbildung 4, Schritt 1/erster grüner Pfeil).
2. Der von *Source 1* ausgelöste Schalldruckverlauf wird dadurch phasenverschoben von den Mikrofonen des Arrays aufgenommen. Diese Phasen- und Laufzeitunterschiede sind der Analyse-Software für den Punkt der Messebene bekannt, da die Schallgeschwindigkeit und der Abstand zur Messebene angegeben wurden. Jeder Messpunkt erhält somit je Mikrofonkanal eigene Verzögerungsparameter ( $\Delta_1 - \Delta_4$ ) (s. Abbildung 4, Schritt 2).
3. Die für den Messpunkt berechneten Laufzeitdifferenzen werden mit den Verzögerungsparametern ausgeglichen. Somit sind die Signalanteile von *Source 1* wieder phasengleich, während alle anderen Anteile unterschiedliche Phasenlagen haben (s. Abbildung 4, Schritt 3).
4. Die Signale aller Mikrofonkanäle werden nun addiert, wodurch die Amplitude des fokussierten Impulses überhört wird. Anschließend wird das Ergebnis durch die Summe der Kanäle geteilt, um die ursprüngliche Amplitude von *Source 1* zu erhalten. Somit werden die Signalanteile aller anderen Schallquellen reduziert, was zu einer fokussierten Betrachtung des Messpunkts führt (s. Abbildung 4, Schritt 4).

Für jeden Punkt der Messebene werden laut gfai tech GmbH <sup>105</sup> nun die ermittelten Kanaldaten der Mikrofone mit den punktspezifischen Laufzeitdifferenzen korrigiert und in eine akustische Karte eingetragen.

Delay-and-Sum-Beamforming im Frequenzbereich verläuft laut der gfai tech GmbH <sup>106</sup> ähnlich wie im Zeitbereich, mit dem Unterschied, dass die Signale durch eine Fourier Transformation in Spektren, also in Amplitude und Phase, umgerechnet werden (s. Abbildung 5, Schritt 2). Da die Laufzeitunterschiede der Messpunkte bekannt sind, können die Phasen durch die Multiplikation eines komplexen Phasenterms korrigiert werden, ohne die Amplituden zu beeinflussen. Dabei werden die Signalanteile von *Source 1* phasengleich ausgerichtet (s. Abbildung 5, Schritt 3). Die komplexen Spektren werden summiert, wobei sich die Anteile von *Source 1* verstärken. Nach einer Normierung der Spektren auf die Anzahl der Kanäle (s. Abbildung 5, Schritt 4), kann der ermittelte Wert in die akustische Karte eingetragen werden.

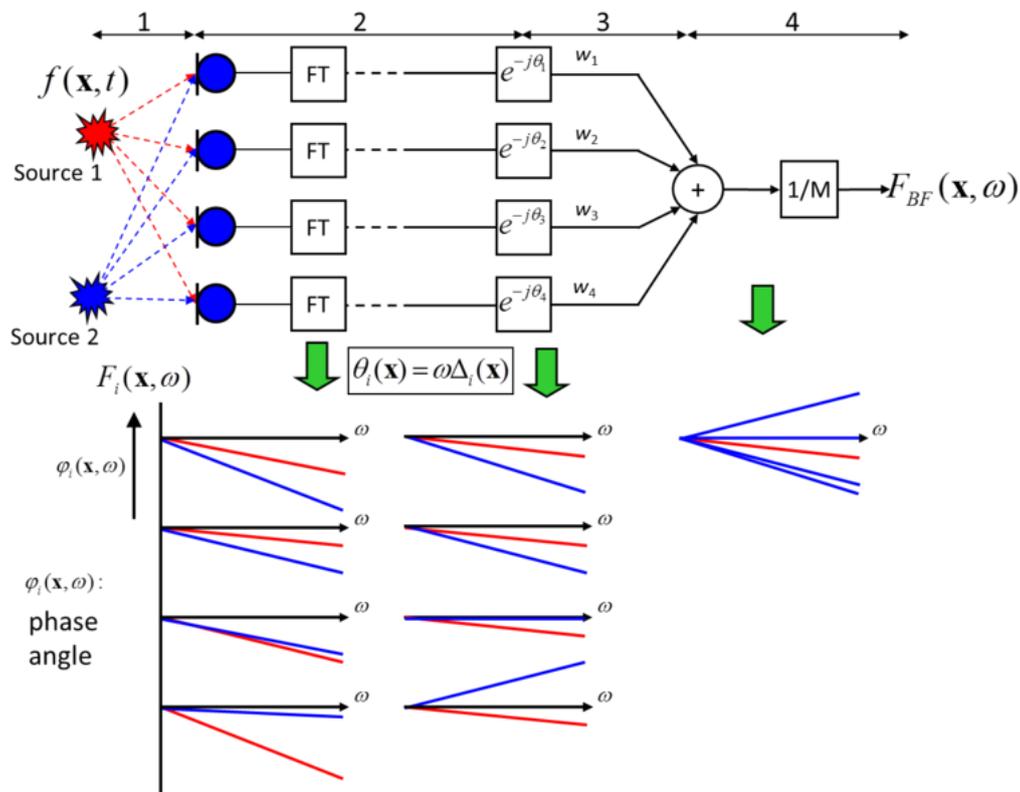


Abbildung 5: Beispielhafter Signalfluss des Beamforming-Prozesses im Frequenzbereich, Quelle: gfai tech GmbH

<sup>105</sup> Gfai tech GmbH 2016

<sup>106</sup> Gfai tech GmbH 2016

## **Array-Modelle**

Jede Mess-Situation hat unterschiedliche Anforderungen an die Mikrofone, weshalb eine Vielzahl an unterschiedlichen bedarfsgerechten Array-Modellen entwickelt wurde. Entscheidende Faktoren sind unter anderen die untere und obere Grenzfrequenz eines Arrays, welche in Kapitel 3.4.3 näher erläutert werden. <sup>107</sup>

Alle Array-Modelle sind laut Kerscher <sup>108</sup> mit speziellen Mikrofonen der Firma Sennheiser ausgestattet (KE 4-211-2). Die Mikrofonkapsel besteht aus einem Elektret-Druckempfänger mit einem Frequenzgang von 20Hz-20kHz (+/-3dB). Der Mikrofonverstärker (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ist eine Entwicklung der *GFaI e.V.*, mit dem Ziel einen geringeren Widerstand und eine verbesserte Rauschunterdrückung zu erlangen.



Abbildung 6: Mikrofon-Strang für individuelle Konstruktion, Quelle: gfai tech GmbH

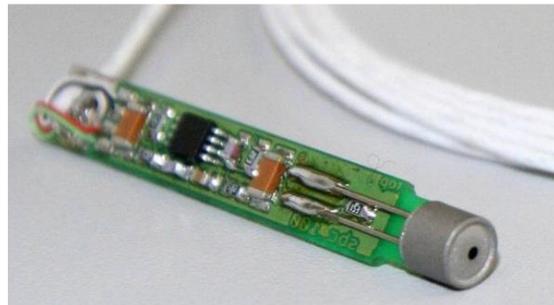


Abbildung 7: Mikrofonkapsel mit Verstärker, Quelle: gfai tech GmbH

Nachfolgend werden nur die für den weiteren Verlauf der Arbeit relevanten Array-Modelle beschrieben. Die Auswahl dieser erfolgte aufgrund bestimmter Kriterien und Anforderungen (s. Kapitel 4.2) durch welche definiert werden konnte, inwiefern die Array-Modelle für die Entwicklung des audiovisuellen Systems geeignet waren. Auf eine detaillierte technische Erklärung wird ebenfalls verzichtet, da sie keine Relevanz für die Ergebnisse hat.

Die verwendeten Modelle können laut der gfai tech GmbH <sup>109</sup> wie folgt beschrieben werden:

### Ring 48-75 AC Pro

Die ringförmige Karbonkonstruktion mit einem Durchmesser von 75cm und 48 implementierten Mikrofonkapseln ist für vielseitige Anwendungen in einer Messdistanz zwischen 0,5m-5m geeignet. Die Geometrie und Anzahl der Mikrofone ermöglichen die

<sup>107</sup> Gfai tech GmbH 2015

<sup>108</sup> Kerscher 2016

<sup>109</sup> Gfai tech GmbH 2016

bestmögliche Quellauflösung und Dynamik der akustischen Darstellung bei einer Kartierfrequenz zwischen 400Hz-20kHz. (s. Abbildung 8 und Abbildung 9)



Abbildung 8: Ring 48-75 AC Pro, Quelle:gfai tech GmbH



Abbildung 9: Ring 48-75 AC Pro, Detail, Quelle:gfai tech GmbH

### Ring 32-35 AC Pro

Dieses Modell basiert auf dem Konzept des zuvor beschriebenen Array *Ring 48-75 AC Pro* (s. Abbildung 10). Der Durchmesser beträgt jedoch nur 35cm mit 32 implizierten Mikrofonen. Bedingt durch die kleinere Geometrie ergibt sich eine empfohlene Messdistanz von 0,3m-3m und eine Kartierfrequenz zwischen 800Hz-20kHz (vgl. Kapitel 3.4.3).



Abbildung 10: Ring 32-35 AC Pro, Quelle: gfai tech GmbH



Abbildung 11: Sphere 48-35 AC Pro, Quelle: gfai tech GmbH

### Sphere 48-35 AC Pro

Das Sphere-Array besteht aus einer akustisch transparenten Karbonfaser-Netz-Konstruktion, hat einen Durchmesser von 35cm und ist mit 48 Mikrofonen ausgestattet (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Messdistanz liegt bei ,3m-5m bei einer Kartierungsfrequenz zwischen 800Hz-20kHz. Diese Konstruktion ermöglicht omnidirektionale Messungen und findet hauptsächlich Verwendung in geschlossenen Räumen. Bedingt durch die Geometrie des Arrays, können rückwärtige Schallquellen unterschieden werden, wodurch eine Rückwärtsdämpfung von bis zu 20dB entsteht.

### **Datenrekorder**

Der Datenrekorder *mcdRec 721* ist nach der *gfai tech GmbH*<sup>110</sup> ein speziell für die Akustische Kamera entwickeltes Datenakquise System mit der Funktion, die elektrischen Signaldaten der Mikrofone digital umzuwandeln. Zum Einsatz kommt ein 32 Bit Audio/Digital-Wandler mit bis zu 7 (speziell entwickelten) Mikrofonkarten welche jeweils 24 symmetrische Kanäle mit 192kHz abtasten. Über einen integrierten Switch werden die Daten via Ethernet-Verbindung an den Computer weitergeleitet und die Kamera des Mikrofon-Arrays angeschlossen (s. Abbildung 12).



Abbildung 12: Datenrekorder *mcdRec 721*, Quelle: *gfai tech GmbH*

### **Noise Image**

Die Software *Noise Image* ist laut Kerscher<sup>111</sup> auf einem Plug-in-Konzept aufgebaut und bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten Geräuschquellen zu analysieren und visualisieren. Das Basis-Modul kann durch Plug-ins für spezifische Funktionen erweitert werden, was eine individuelle Softwaregestaltung ermöglicht. Die Kanaldaten werden über einen Aufnahme-Dialog auf der Festplatte gespeichert und können anschließend analysiert werden. Die

<sup>110</sup> Gfai tech GmbH 2015

<sup>111</sup> Kerscher 2016

Analyse wird durch Bewertung, Filterung und Eingrenzung der Kanaldaten vollzogen. Mehrere Analyse-Schritte können beliebig miteinander verknüpft und Geräuschquellen so parallel unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden (s. Abbildung 13).

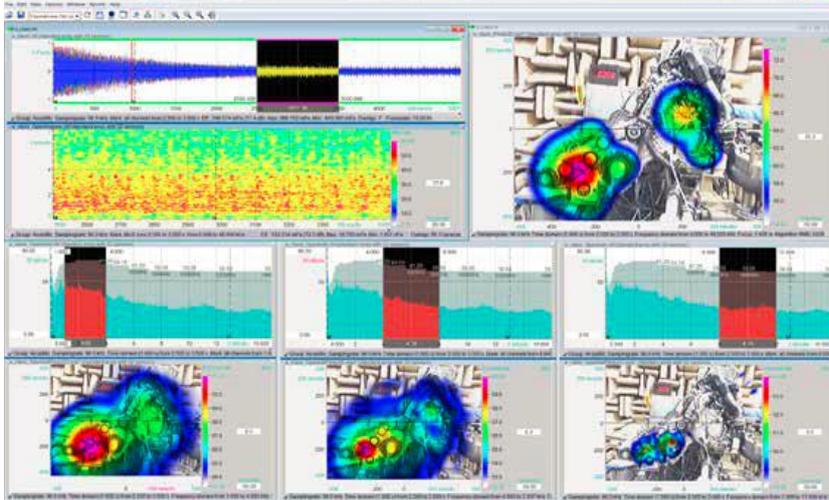


Abbildung 13: Noise Image - Parallel-Analyse, Quelle: gfai tech GmbH

Bei der Visualisierung des Schalls wird der am Bildpunkt ermittelte Schallpegel gemäß einer Farbskala in einen Farbwert übertragen. Die Darstellung des Schalldrucks ist standardisiert an die Spektralfarben des Lichts angelehnt, wobei der niedrigste Wert der Farbe Blau und der maximale Violett zugeordnet wird. Der Dynamikumfang, also der Bereich zwischen kleinsten und größten Wert des darzustellenden Schalldrucks, kann vom Benutzer voreingestellt werden.

Die ermittelten lokalen Schalldruckpegel können als akustisches Foto/Film betrachtet, als auch auf ein vorgefertigtes 3D-Modell übertragen und abgespielt werden. Hierfür können 3D-Scanner-Daten oder CAD-Modelle importiert werden (s. Abbildung 14 und Abbildung 15). Besonders bei Messungen in geschlossenen Räumen oder stark strukturierten Messebenen werden 3D-Modelle eingesetzt, da so der Abstand jedes Messpunkts (Fokus) exakt bestimmt werden kann (vgl. Kapitel 3.4.3).

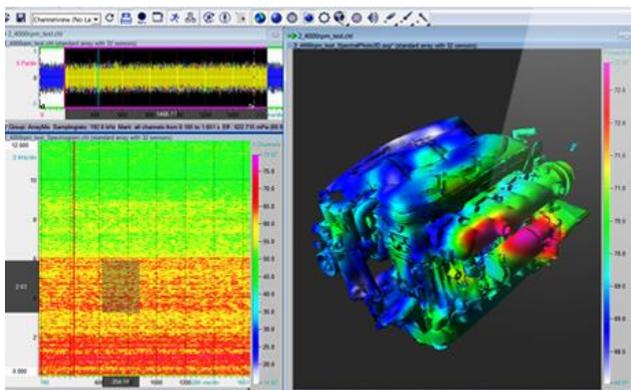


Abbildung 14: Noise Image - Kartierung auf 3DModell, Quelle: gfai tech GmbH

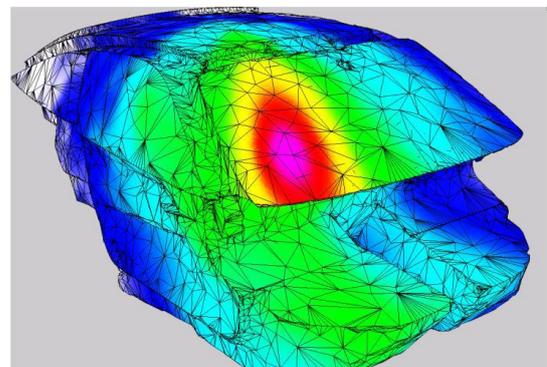


Abbildung 15: 3D-Modell eines Fahrzeug-Innenraums mit Kartierung, Quelle: gfai tech GmbH

Desweiteren besteht die Möglichkeit die Daten im „Live-View“, also in Echtzeit anzuzeigen. Hierfür werden die Kanaldaten als Datenstrom abgetastet und ein definierter Zeitbereich für die Analyse verwendet. Auf Grund der hohen Abtastraten und somit entstehenden großen Datenmenge ist die Präzision der Analyse von gespeicherten Daten jedoch höher. <sup>112</sup>

*Noise Image* bietet eine Vielzahl an Darstellungsformen und Analysefunktionen und ist bezüglich der Qualität der Geräuschanalyse die wichtigste Komponente des Messsystems. Auf Grund des Schwerpunkts dieser Arbeit wurde jedoch keine weiterführende detaillierte Beschreibung dieser Funktionen vorgenommen.

### **3.4.2. Anwendungsbereiche**

Häufiger Anwendungsbereich der Akustischen Kamera ist, wie durch die *gfai tech GmbH* <sup>113</sup> beschrieben, die Geräuschanalyse und Fehlererkennung in der Industrie, wo häufig Produkte oder Einrichtungen unter bestimmten akustischen Bedingungen analysiert werden. Jedoch sind die Tätigkeitsfelder und deren Anwendungsmöglichkeiten vielfältig, da die Akustik von Produkten ein immer wichtigerer Qualitätsaspekt wird und die Reduzierung von Schallemission im Umweltschutz zunimmt. <sup>114</sup>

### **3.4.3. Probleme**

#### ***Fokusabhängigkeit***

Die genaue Angabe der Distanz zwischen der Messebene und dem Mikrofon-Array ist laut der *gfai tech GmbH* <sup>115</sup> notwendig, um präzise Messergebnisse zu erhalten. Vergleichbar mit einer optischen Kamera, wo die Brennweite der Linse den Fokus definiert, wird der Fokus bei der Akustischen Kamera durch die Messdistanz definiert. Bei einer stark strukturierten Oberfläche eines Objektes (s. Abbildung 16) kann eine abweichende Messdistanz zu Messfehlern führen, da für die Berechnung des Messpunkts falsche Verzögerungsparameter (vgl. Funktionsweise, S.15) verwendet werden. Um diese Ungenauigkeiten auszugleichen, wird der Einsatz von 3D-Modelle empfohlen (vgl. *Noise Image*, S.21).

---

<sup>112</sup> Kerscher 2016

<sup>113</sup> Gfai tech GmbH 2015

<sup>114</sup> Gfai tech GmbH 2015

<sup>115</sup> Gfai tech GmbH 2016

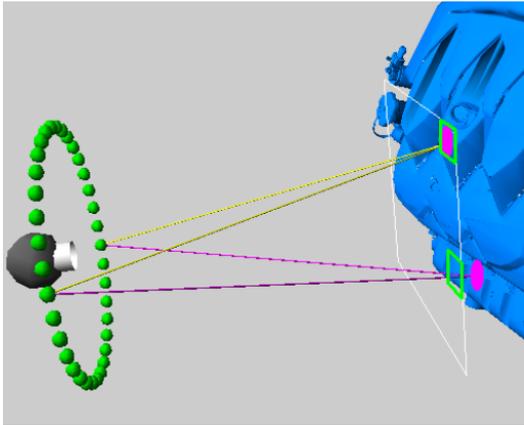


Abbildung 16: Fokus auf strukturierter Messebene, Quelle: gfai tech GmbH

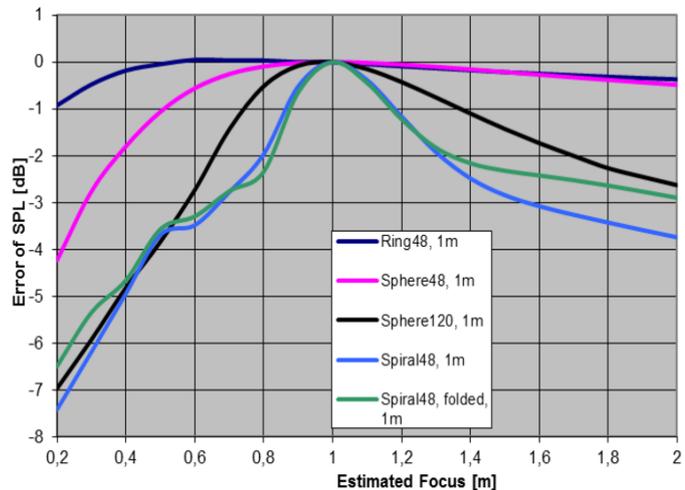


Abbildung 17: Fokusabhängigkeit unterschiedlicher Mikrofon-Arrays, Quelle: gfai tech GmbH

Die Geometrien der Mikrofon-Arrays weisen laut gfai tech GmbH <sup>116</sup> im Allgemeinen unterschiedliche Empfindlichkeiten bezüglich der Fokussierungsgenauigkeit auf. Abbildung 17 zeigt die verschiedenen Pegelabweichungen in Abhängigkeit zur Fokussierungsabweichung verschiedener Array-Modelle einer Schallquelle (weißes Rauschen) bei einer Messdistanz von 1 m (Die Spiral-Arrays finden im Rahmen dieser Arbeit keine Erwähnung).

### **Grenzfrequenzen und räumliche Auflösung eines Mikrofon-Arrays**

Bei der Messung und Kartierung von Schallemissionen sind laut Kerscher <sup>117</sup> die Mikrofon-Arrays jeweiligen Grenzfrequenzen unterlegen. Diese Grenzen sind durch die Geometrie und die Anordnung der implizierten Mikrofone bedingt, da die messbare Wellenlänge des Schalls ( $\lambda$ ) und die räumliche Auflösung der Arrays zusammenhängen. Jedes Mikrofon-Array hat eine bestimmte „Verzögerungstiefe (dt)“ welche durch den größten Abstand zweier Mikrofone, also die Mikrofon-Array-Breite, gegeben ist. Wird eine tiefe Frequenz gemessen, sind die Verzögerungsunterschiede in Vergleich zur Wellenlänge klein, da alle Mikrofone dieselbe Welle aufnehmen (s. Abbildung 18, a). Bei der Messung einer hohen Frequenz dagegen befinden sich mehrere Wellen innerhalb des Arrays in einem vergleichsweise großen zeitlichen Abstand, woraufhin jedes Mikrofon eine andere Welle aufnimmt (s. Abbildung 18, b). Die angegebenen Grenzfrequenzen eines Array-Modells (s. Array-Modelle, S. 19) ergeben sich somit aus dem maximalsten und minimalsten Abstand der Mikrofone auf einem Array.

Weiter wird daher auch die räumliche Auflösung einer Frequenz beeinflusst, was dazu führt, dass tiefe Frequenzen größer dargestellt werden als hohe Frequenzen. In Abbildung 19 und

<sup>116</sup> Gfai tech GmbH 2016

<sup>117</sup> Kerscher 2016

Abbildung 20 wird verdeutlicht wie der Quellendurchmesser einer Punktquelle (weißes Rauschen) bei unterschiedlicher Filterung variiert.

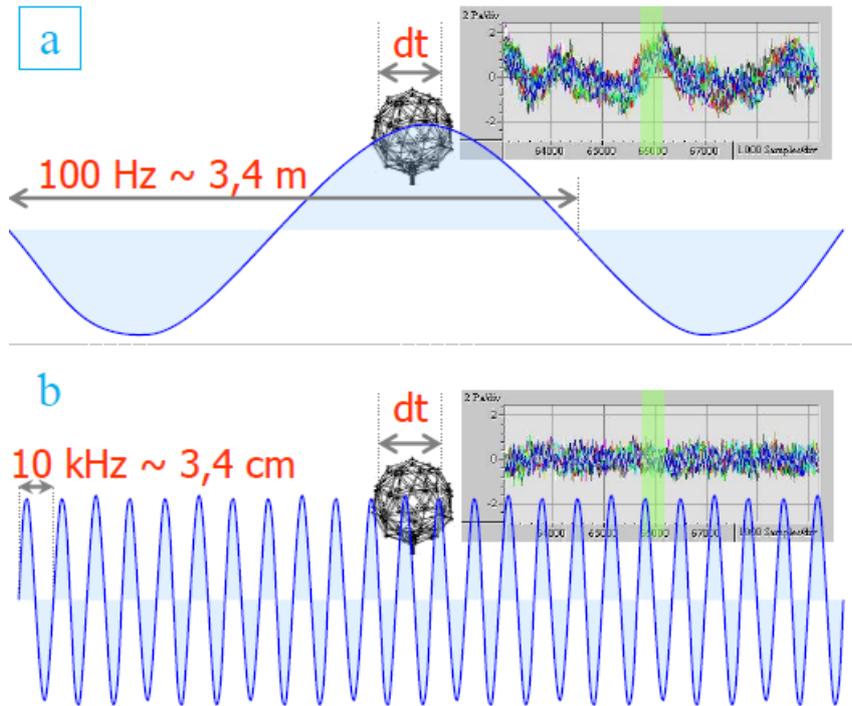


Abbildung 18: Beziehung der Verzögerungstiefe ( $dt$ ) zur Wellenlänge, Quelle: gfai tech GmbH

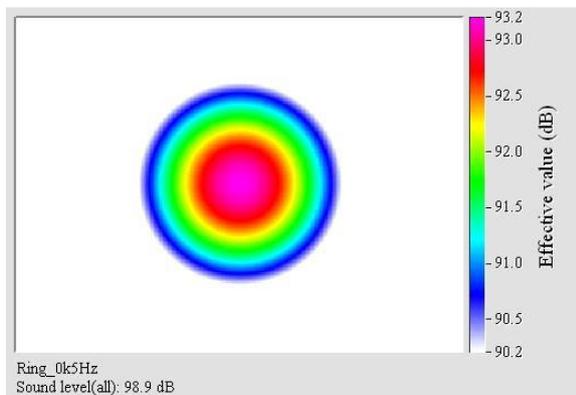


Abbildung 19: Räumliche Auflösung von 500Hz, Quelle: gfai tech GmbH

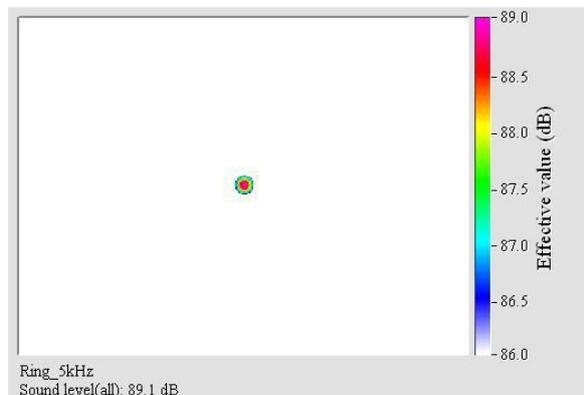


Abbildung 20: Räumliche Auflösung von 5kHz, Quelle: gfai tech GmbH

## 4. Entwicklung und Überprüfung eines Live-Systems zur Transformation auditiver in visuelle Signale

### 4.1. Überblick Vorgehensweise

#### 4.1.1. Zielsetzung

Um akustische Signale visuell erfahrbar zu machen, wird nachfolgend ein beispielhaftes System entwickelt, welches im weiteren Verlauf als Grundlage von Messungen und als Evaluationsgegenstand hinsichtlich verschiedener technischer Kriterien dient. Ziel bei der Entwicklung dieses Systems ist die Umsetzung akustischer in visuelle Signale, die Transformation dieser visuellen Signale in eine festgelegte Bildsprache und die abschließende Ausgabe dieser visuellen Signale durch eine Projektion.

#### 4.1.2. Vorgehensweise

Um ein funktionierendes System zur Übermittlung akustischer in visuelle Signale zu entwickeln, werden in einem ersten Schritt die nötigen Anforderungen definiert und klassifiziert, welche dann als Grundlage für die Umsetzung eines Systems genutzt werden. Anschließend wird das System bezüglich der Anforderungen überprüft und letztlich in einem musikalischen Projekt eingesetzt.

### 4.2. Anforderungen an das System

Da das zu entwickelnde System als primäre Anforderung die Transformation akustischer in visuelle Signale beinhaltet, ist es zwingend erforderlich, eine Aufnahme akustischer Signale durch das System sowie deren visuelle Ausgabe zu ermöglichen. Des Weiteren ist es notwendig zu garantieren, dass die aufgenommenen akustischen Signale verlässlich transformiert und synchron an das visuelle Ausgabesystem übermittelt werden. Außerdem soll die Möglichkeit auf eine räumliche Zuordnung des auslösenden auditiven Reizes zum erzeugten visuellen Signal gegeben sein. Dazu muss eine Transformation akustischer in visuelle Signale erfolgen sowie eine Strukturierung und Wiedergabe dieser visuellen Signale in einer erwünschten gestalterischen Anordnung. Diese grafische Darstellung wiederum muss sowohl den Anforderungen der menschlichen Seh Wahrnehmung entsprechen, sowie eine räumliche Zuordnung von der akustischen Quelle zur visuellen Ausgabe ermöglichen.

Abschließend sind auch Anforderungen bezüglich der Ausgabe relevant. Zu diesen gehören geräteunabhängig eine qualitative Ausgabe bezüglich der Auflösung oder des Kontrastverhältnisses, sowie eine räumliche Anpassung bezüglich Raumstrukturen oder Raumgrößen in Abhängigkeit des Abstandes des Betrachters, als auch eine Verbindung zwischen den Hörreizen und dem Ausgabesignal.

Allgemein lassen sich die in dieser Analyse generierten Anforderungen bezüglich der Eingabe (Schallaufnahme und -lokalisierung), der Transformation (Transformation des Schalls in visuelle Signale und Transformation der visuellen Signale in eine grafische Darstellung) sowie der Ausgabe (Ausgabe der grafischen Darstellung zum Beispiel durch Projektion) kategorisieren (s. Abbildung 21) Hieraus leitet sich auch eine erste Gliederung des Systems ab.

#### 4.2.1. Systemarchitektur

Eine erste Gliederung des Systems, welche als Grundlage für die weitere Entwicklung des Systems dient, leitet sich aus den Systemanforderungen (s. Kapitel 4.2) ab und ist in Abbildung 21 dargestellt:

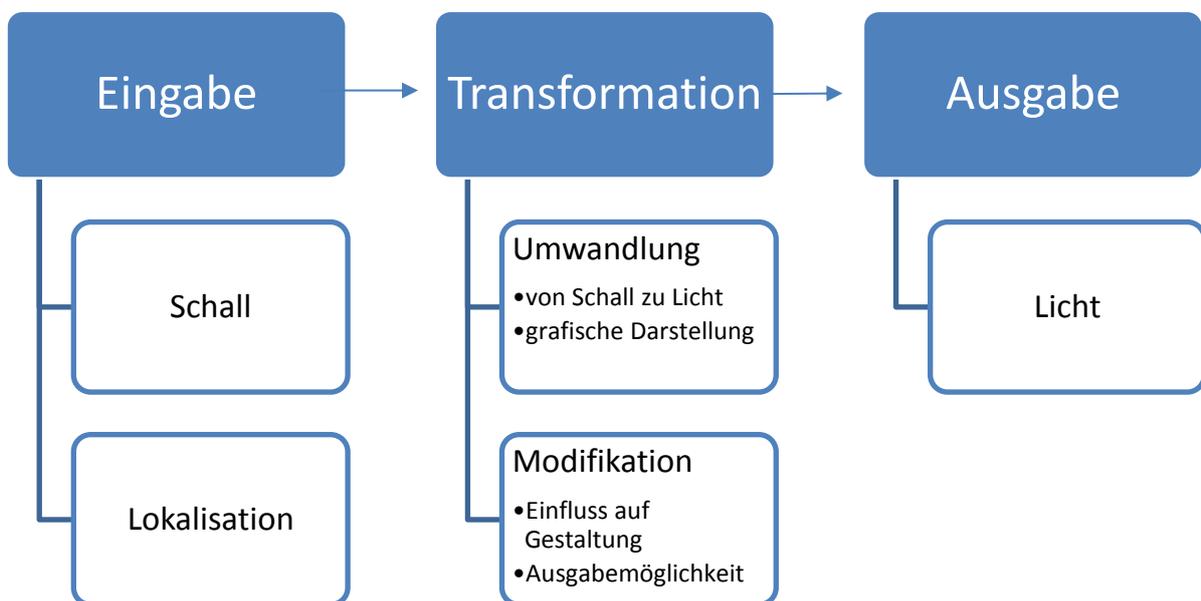


Abbildung 21: Gliederung des Systems nach Kategorien von Systemanforderungen, Eigene Darstellung

## 4.3. Aufbau des Systems zur visuellen Wiedergabe akustischer Signale

### 4.3.1. Auswahl der Systemkomponenten und der Schallquelle

Bezüglich des Eingabesystems fiel die Wahl auf die bereits in Kapitel 3.4.1 erläuterte *Akustische Kamera*, da diese den Anforderungen in mehreren Punkten entspricht. Das Messsystem ist in der Lage, einerseits analoge Schallereignisse in hoher Qualität aufzunehmen und mittels Audio/Digital-Wandler digital nutzbar macht, andererseits diese Signale einer definierten Position im Raum zuzuordnen. Auch die Anforderungen an die Transformationsebene sind bereits teilweise durch die Akustische Kamera abgedeckt, da die Analyse-Software *Noise Image* die lokalen Schalldruckpegel in Farbwerte transformiert und als Schallkarte darstellt. Die dadurch resultierende Kopplung von auditiven und visuellen Signalen, ist eine Anlehnung an die Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung (s. Kapitel 2.1.4).

Um die Anforderungen der grafischen Modifikation der Signale und die Möglichkeit diese an ein Ausgabegerät weiterzuleiten zu erfüllen, wurde zusätzlich die Visualisierungs-Software *Resolume* verwendet. Mithilfe von *Resolume* konnte die grafische Schallkarte einerseits an ein ausgabefähiges Gerät weitergeleitet werden und andererseits optisch modifiziert werden. Als Vermittlungskomponente zwischen *Noise Image* und *Resolume* wurde eine Open-Source-Anwendung mit einer Echtzeit-Aufnahme-Funktion und einer Sender/Empfänger-Einheit auf Ethernet-Basis gewählt (s. Kapitel 4.3.2).

Als Ausgabegerät wurde ein Projektor gewählt, da die Darstellungsgröße, z.B. im Vergleich zu einem Display, leichter und mit geringerem technischem Aufwand skalierbar ist, was eine Anpassung an den Raum ermöglicht (vgl. Kapitel 3.2.). Außerdem benötigt eine Projektion als Projektionsfläche ein Objekt im Raum. Da die zu projizierende akustische Schallkarte emittierende Objekte sichtbar macht, können diese Objekte synchron die Bildebene der Projektion sein. Somit sind Schall und Licht in einer geeigneten Verbindung.

Die Schallquelle soll eine musikalische Inszenierung sein, um vor dem technischen Hintergrund des Mess-Systems eine künstlerische Verbindung von Ursache und Schall zu Wirkung und Licht zu schaffen.

### 4.3.2. Technischer Aufbau und Software

Prinzipiell kann der technische Aufbau in drei Bereiche *Akustische Kamera*, *Computer* und *Projektor* eingeteilt werden. Wie im Kapitel 3.4.1 bereits beschrieben, besteht die Akustische Kamera aus einem Mikrofon-Array, einem Datenrecorder und einem Laptop (*Computer1*, s. Abbildung 22) zur Verarbeitung der Daten. Die Schallsignale werden in *Noise Image* insofern gefiltert und bewertet, dass eine Reduzierung der zu analysierenden

Datenmenge erfolgt und eine Darstellung der Schallkarte im *Live-View* möglich ist. Diese Reduzierung muss abhängig von der Art der Schallquelle individuell eingestellt werden um diese möglichst exakt darzustellen. Die akustischen Bilder werden vorerst nur in einem integrierten Plug-In von *Noise Image* auf *Computer1* sichtbar. Um die Bilder in die Visualisierung zu integrieren muss eine Verbindung zwischen *Computer1* und *Computer2* hergestellt werden. *Noise Image* verfügt über keine integrierte Export-Funktion der Kartierung in Echtzeit, daher muss eine Alternative entwickelt werden. Eine Möglichkeit eine Kommunikation zwischen Computern herzustellen ist eine LAN-Verbindung (Lokal Area Network). Dieses eignet sich gut um große Netzwerke zwischen Computer und Peripheriegeräten herzustellen. Es basiert auf dem heutzutage gängigen Ethernet-Standard IEEE802.3. Je nach Übertragungsmedium und Größe des Netzwerks sind maximale Ausbreitungen zwischen 500m bis 1000m möglich bei bis zu 1000 Stationen. <sup>118 119</sup>

Da bereits der Datenrekorder der akustischen Kamera und *Computer1* über eine LAN-Verbindung kommunizieren um die ermittelten Daten weiterzuleiten, kann auch *Computer2* in dieses Netzwerk integriert werden. Um die Kommunikation jedoch zu realisieren ist ein Kopplungselement notwendig welches die Geräte miteinander verbindet. Diese Kopplungselemente müssen bezüglich Zeit und Signalstärke möglichst verlustfrei sein um den in Kapitel 4.2 definierten Ansprüchen zu entsprechen. Mögliche Kopplungselemente sind Hub´s und Switches, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

- Ein Hub stellt in einem Netzwerk eine Verbindung in Stern-Topologie zwischen allen Teilnehmern her, säubert das Signal von Störungen und leitet die Informationen verstärkt weiter. Aus diesem Grund nennt man Hubs auch „Multiport-Repeater“ <sup>120</sup>. Ein Hub ist nicht in der Lage die Quelle oder das gewünschte Ziel zu identifizieren und sendet so jede Information an alle Netzwerkteilnehmer. Auch können Informationen nicht gleichzeitig gesendet und empfangen werden, was die Datenübertragungsrate einschränkt und Hubs langsamer macht als Switches. <sup>121 122</sup>
- Switches dagegen fungieren ebenso als Kopplungselemente, jedoch als „Multiport-Bridges“ <sup>123</sup> was bedeutet, dass die Hardware-Adressen der Teilnehmer protokolliert und Daten so gezielt weitergeleitet werden. Daten sind so nur noch auf direktem Weg zwischen Quelle und Ziel im Netzwerk. Diese Weiterleitungsentscheidung und

---

<sup>118</sup> Baun 2015, S. 18

<sup>119</sup> Elektronik Kompendium 2016

<sup>120</sup> Baun 2015, S. 21

<sup>121</sup> Baun 2015, S. 21

<sup>122</sup> Benjamin O. Orndorff 2016

<sup>123</sup> Baun 2015, S. 22

die Fähigkeit Informationen gleichzeitig senden und empfangen zu können, ermöglicht eine deutlich höhere Datenübertragungsrate als bei einem Hub.<sup>124 125</sup>

Bei der Untersuchung der Komponenten der Akustischen Kamera wurde deutlich, dass die in den Mikrofon-Arrays integrierten optischen Kameras die Daten mittels Ethernet-Kabel übermitteln. Als Kopplungselement dient dabei ein im Datenrekorder integrierter Switch, welcher für die Kommunikation zwischen *Computer1* und *Computer2* verwendet werden kann.

Eine systematische Internetrecherche hat außerdem ergeben, dass verschiedene Zusätzliche Programme installiert werden müssen um eine Verbindung mittels Ethernet zwischen *Resolume* und anderen Computern herzustellen. Da *Resolume* keine Möglichkeit anbietet Bildquellen von Netzwerken zu importieren, wurde die Open-Source Anwendung *Spout* verwendet.<sup>126</sup>

*Spout* ist eine Anwendung für Windows-Betriebssysteme um Videoinhalte in Echtzeit zu übermitteln. Dabei werden Sender und Empfänger definiert, welche *FreeframeGL Plugins* enthalten.<sup>127</sup> *Freeframe* ist ein Programmiergerüst<sup>128</sup> speziell für die Entwicklung und Kommunikation von Video-Plug-ins<sup>129</sup>. *Resolume* erkennt das Spout-Empfänger-Plug-in, welches somit automatisch als Bildquelle für eine Komposition definiert werden kann. Dennoch war es nicht möglich *Noise Image* als Sender zu nutzen da hierfür kein Plug-in besteht. Da *Spout* eine Open-Source-Anwendung ist, bestand jedoch die Möglichkeit Sender und Empfänger als Quellcode in andere Anwendungen zu implementieren. Die Open-Source-Anwendung *ScreenCatcher* (Echtzeit-Bilderfassung eines Bildschirms) von der Agentur *Onformative* ermöglicht einen Transfer von Bildschirmhalten eines definierten Fensters in ein Ausgabe-Fenster. Nach einer Analyse des Quell-Codes dieser Anwendung konnte die Methode zum ausführen des Sender-Plug-ins von *Spout* in den *ScreenCatcher* impliziert werden. Die modifizierte Anwendung wird in *SpoutCapture* umbenannt. Jedoch war *Spout* nicht für die Nutzung in einem Netzwerk, sondern auf nur einem Computer vorgesehen. Eine weitere Recherche hat ergeben, dass hierfür die Software *TCPSpout*, ein Dienstprogramm um *Spout* in einem Netzwerk unter mehreren Nutzern zu teilen, eingesetzt werden konnte<sup>130</sup>.

---

<sup>124</sup> Baun 2015, S. 22

<sup>125</sup> Benjamin O. Orndorff 2016

<sup>126</sup> Resolume 2014

<sup>127</sup> Spout o.J.

<sup>128</sup> dict 2016

<sup>129</sup> Sourceforge o.J.

<sup>130</sup> TECHLIFE SG Pte.Ltd. 2016, Startseite

### 4.3.3. Pipeline

In Abbildung 22 wird nachfolgend eine Übersicht über den in Kapitel 4.3.2 entwickelten Signalfluss, die eingesetzten Komponenten und die Software dargestellt.

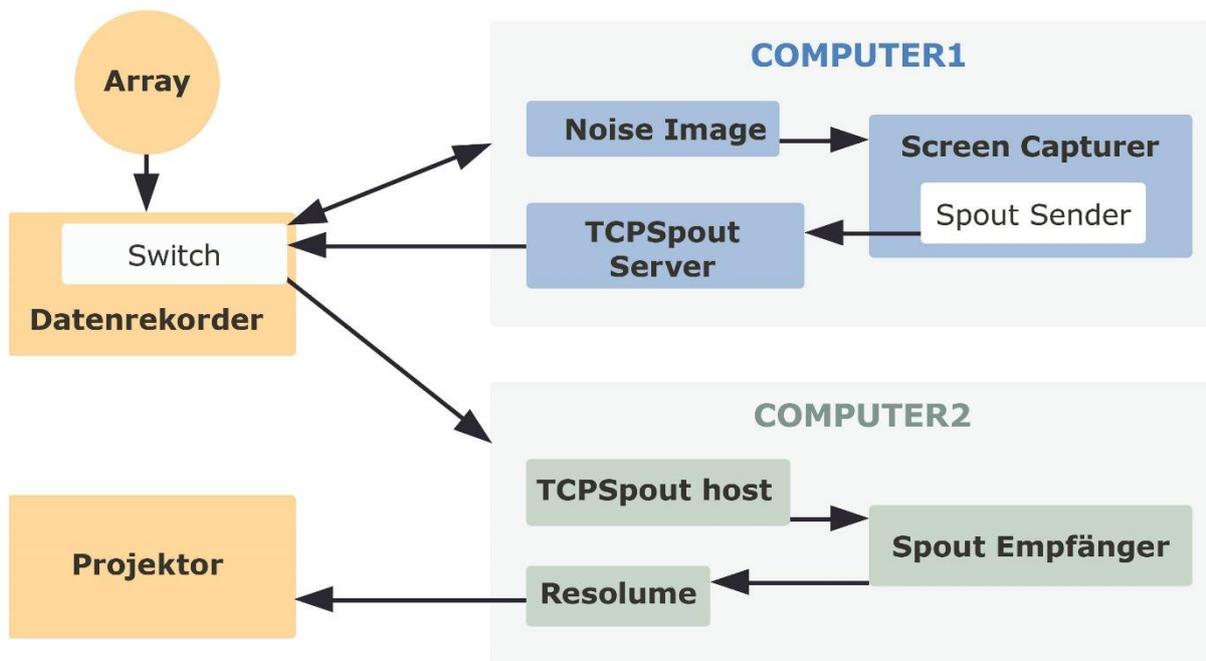


Abbildung 22: Pipeline des audiovisuellen Live-Systems - Eigene Darstellung

### 4.3.4. Aufstellung und Projektion

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests zur Überprüfung des entwickelten Systems (vgl. Kapitel 4.4.1), war die Wahl des Raumes eingeschränkt. Aufgrund versicherungstechnischer Vorschriften konnte die Akustische Kamera nur innerhalb des Firmengeländes der gfai tech GmbH verwendet werden. Als Vorführraum wurde daher ein Saal mit ca. 70qm Grundfläche von der gfai tech GmbH zur Verfügung gestellt. Da der Saal für Vorträge und Besprechungen vorgesehen ist, war die Architektur und Einrichtung an die akustischen Voraussetzungen angepasst. So verfügt der Raum neben einem schallabsorbierenden Boden auch über eine Wand mit weißer schallabsorbierender Zellulose-Beschichtung. Diese Wand eignet sich als Projektionsfläche und Hintergrund für die Künstler, weil einerseits keine Begrenzung der Projektionsfläche z.B. durch eine Leinwand bestand und andererseits mögliche störende Schallreflexionen verringert werden <sup>131</sup>.

<sup>131</sup> Kerscher 2016

Der Aufbau der Computer und des Datenrekorders war in einem Abstand von 6 Metern und der des Mikrofon-Arrays in 5 m zur Projektionsfläche geplant. Mit 0,5 m Abstand zwischen Projektionsfläche und Künstler ergab sich eine Messdistanz von 4,5 Metern (s. Abbildung 23).

Damit die Projektion den in Kapitel 4.2 definierten Anforderungen entspricht, musste auf eine exakte Positionierung des Projektors geachtet werden. Da der Projektor die von der Akustischen Kamera erstellten Bilder auf die schallemittierenden Objekte wiedergeben soll, muss die Position der Kamera und des Projektors möglichst übereinstimmen, um keine perspektivisch verzerrte Darstellung zu erhalten. Das Array und das Objektiv des Projektors müssen möglichst auf einer Ebene sein um einen Schattenwurf durch das Array zu vermeiden. Somit ist der Abstand des Projektors durch die Position des Arrays vorgegeben. Die Geometrie des Ring-Arrays ermöglicht dabei eine fast zentrale Positionierung des Projektors neben der im Array integrierten Kamera (s. Abbildung 24).

Die visuelle Gestaltung des interaktiven Systems bzw. der projizierten Inhalte ist Teil dieser Arbeit, jedoch wird die Funktion der Entwicklung priorisiert. Um dennoch eine eindrucksvolle Darstellung zu erhalten, wird die Projektionsfläche in zwei Ebenen unterteilt.

Um zu gewährleisten, dass die Projektion mit den akustischen Ereignissen korreliert, muss die Projektionsfläche, um sichtbare Ränder zu vermeiden, den Handlungsraum der Künstler vollständig abdecken. In dieser *Hauptbildebene* wurde die akustische Visualisierung projiziert um die transferierten visuellen Signale jederzeit deren Schallereignissen zuordnen zu können.



Abbildung 23: Versuchsaufbau von hinten,  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 24: Versuchsaufbau von vorn,  
Quelle: Eigene Darstellung

### 4.3.5. Grafische Bearbeitung

Die Bearbeitung und Skalierung der Visualisierung findet hauptsächlich über die Software *Resolume* statt. Um eine Grundlage für mehr gestalterischen Spielraum für zukünftige Projekte zu legen, soll dem System eine Möglichkeit beigefügt werden welche es ermöglicht die visualisierten Schallsignale der Akustischen Kamera zusätzlich zu manipulieren. Dafür sollen die Flächen des kubischen Objekts durch die mit der Anwendung *ScreenCapturer* generierten Bildinhalten bespielt werden. Die darin enthaltene Erweiterung *ScreenCapturerGrid* basiert auf dem bereits in Kapitel 4.3.2 beschriebenen *ScreenCapturer* mit der Besonderheit, dass der Bildinhalt bei der Ausgabe in eine dreidimensionale Würfel-Matrix unterteilt wird und von unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden kann. Jeder Würfel bekommt den Farbwert zugewiesen welcher der Position des Originalbildes entspricht, wodurch der Bildinhalt aus größeren, dreidimensionalen Pixeln besteht. Jedem Würfel wird eine Tiefeninformation zugewiesen, deren Z-Wert sich von dessen jeweiliger Helligkeit ableitet (s. Abbildung 25, von links: Capture-Fenster, Pixel-Matrix, Pixel-Matrix gedreht)

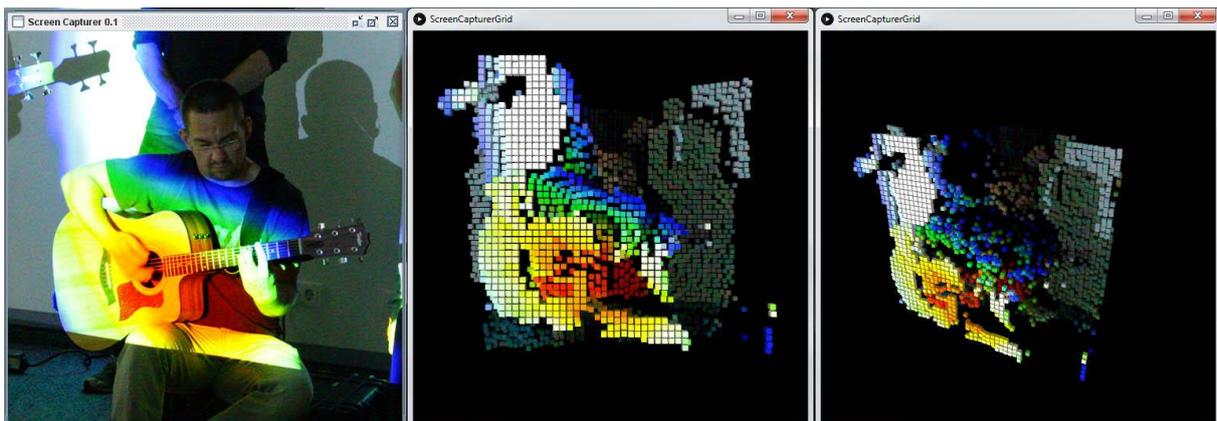


Abbildung 25: ScreenCapturerGrid, Quelle: Eigene Darstellung

Da die räumliche Darstellung nur Helligkeiten berücksichtigt und nicht ausreichend mit der Farbdarstellung der Akustischen Kamera korreliert, sowie der Abtast- und Umrechnungsprozess des Bildinhalts sehr Leistungsintensiv war, wurde der Quellcode (s. Kapitel 9.4) wie folgt modifiziert:

- Die Darstellungsform der Rasterelemente (leuchtende Würfel) wurde in einfachere Geometrien (zweidimensionale Kacheln) umgewandelt um die Anforderungen an den Grafikprozessor (GPU) zu reduzieren.
- Durch diese Leistungsverbesserung der GPU, konnte die Auflösung erhöht werden.
- Zusätzliche Darstellungsoptionen wie z.B. die Einfärbung der Pixelränder wurden deaktiviert.

- Die Berechnung der Tiefeninformation jedes Pixels wurde so modifiziert, dass unter Berücksichtigung der Farbdarstellung der Akustischen Kamera (Violett/Blau, s. Kapitel 3.4.1) die Bildbereiche mit dem lautesten Schallpegel am stärksten transformiert werden, was die Visualisierung von Pegelunterschieden noch verdeutlichen soll. Dafür wurde der Hue-Wert (ein Bogenwinkel des Farbtons im HSV-Farbraum) des Pixels als Tiefeninformation verwendet. Da der Hue-Wert bei Rot  $0^\circ$  bzw.  $360^\circ$  beträgt <sup>132</sup>, musste dieser Wert, entsprechend der Farbskala des Schalldruckpegels in *Noise Image*, auf Violett umgerechnet werden .

Die somit modifizierte Anwendung wird *SpoutGrid* genannt.

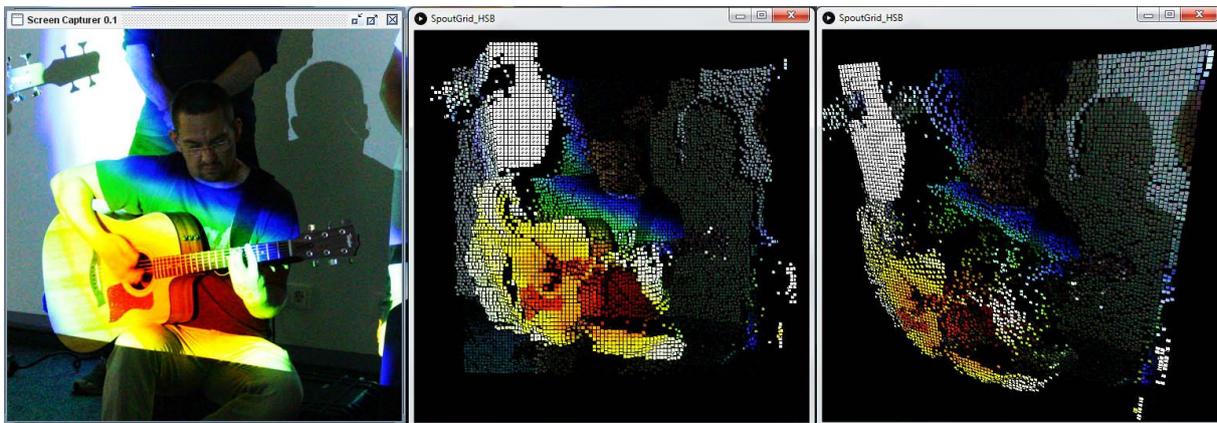


Abbildung 26: *SpoutGrid*, Quelle: Eigene Darstellung

## 4.4. Überprüfung des entwickelten Systems anhand bestimmter Anforderungskriterien

### 4.4.1. Vorgehensweise

#### **Testverfahren**

Um eine funktionsfähige und sachgemäße (s. Kapitel 4.2) Liveanwendung zu entwickeln, musste das gesamte System vorab einer analytischen Überprüfung unterzogen werden. Hierfür wird ein Testverfahren der Software-Entwicklung nach Hoffmann <sup>133</sup> als Vorlage verwendet, welches im ersten Schritt eine Klassifikation des Tests durch dessen Unterteilung in die Kategorien Prüfebene, Prüfkriterium und Prüfmethodik vornimmt.

<sup>132</sup> Hasche und Ingwer 2016, S. 34

<sup>133</sup> Hoffmann 2008, S. 158

Nachfolgend werden diese Testkategorien mit Hinblick auf die für die Überprüfung des audiovisuellen Systems relevanten Komponenten genauer dargelegt.

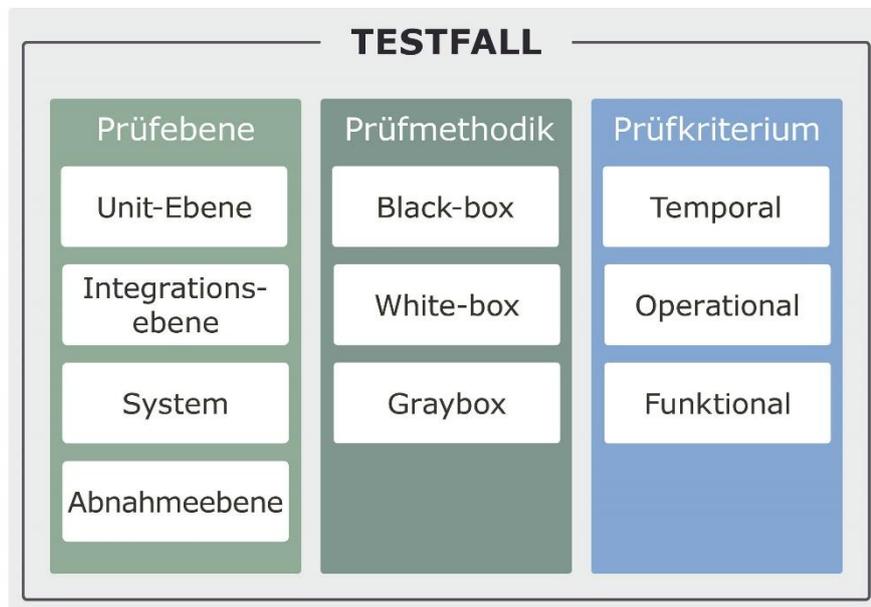


Abbildung 27: Testschema für Software nach Hoffmann <sup>134</sup> - Eigene Darstellung

Da es für die Systementwicklung notwendig ist, software- und hardwaretechnische Elemente zu berücksichtigen, darf sich der Systemtest nicht ausschließlich auf die Evaluation der Softwarekomponenten beziehen (vgl. Abbildung 27). Hierzu wird unter Berücksichtigung der drei Kategorien für Softwaretests nach Hoffmann <sup>135</sup> ein Verfahren verwendet, welches sich im Aufbau und Ablauf direkt an dieses anlehnt. Einzelne Vorgehensweisen werden dabei jedoch modifiziert, um ein passendes Testverfahren zur Untersuchung der Funktionsweise des entwickelten audiovisuellen Systems zu erhalten. Dazu werden nachfolgend bestimmte, für diese Arbeit relevante Test-Kategorien nach Hoffmann <sup>136</sup> aufgeführt und deren Modifizierung bzw. Anpassung an das audiovisuelle System beschrieben.

Prüfebenen:

Nach Hoffmann <sup>137</sup> wird das Testverfahren in die Prüfebenen Unit-Test, Integrationstest und Systemtest unterteilt:

<sup>134</sup> Hoffmann 2008, S. 158

<sup>135</sup> Hoffmann 2008, S. 159

<sup>136</sup> Hoffmann 2008, S. 158

<sup>137</sup> Hoffmann 2008, S. 159

- **Unit-Tests** sind laut Hoffmann (ebd.) Programmeinheiten die eigenständig getestet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit sind die zu testenden *Units* eigenständige Komponenten des audiovisuellen Systems, beispielsweise ein Mikrofon-Array oder *SpoutGrid* (s. Kapitel 4.3.2)
- Nach Hoffmann <sup>138</sup> werden **Integrationstests** eingesetzt wenn Programmmodule zu größeren Softwarekomponenten zusammengesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Integration auf die gesamte Komposition des Systems aus einzelnen Komponenten (s. 4.3.2).
- Ein **Systemtest** ist laut Hoffmann <sup>139</sup> eine Überprüfung des gesamten Systems bezüglich dessen Funktion. Diese Definition ist auch für die Systemtests im Rahmen dieser Arbeit zutreffend.

Prüfkriterien:

Innerhalb der Prüfebene unterteilt Hoffmann <sup>140</sup> die Prüfkriterien zur Definition auf was das System getestet werden soll:

- Funktionaler Test
  - **Funktionstests** sollen nach Hoffman (ebd.) sicherstellen, dass das System für vorgegebene Eingangsgrößen die Ausgangsgrößen korrekt wiedergibt. In dieser Arbeit werden Funktionstests nicht bezüglich einer definierten Datenmenge durchgeführt. Stattdessen findet eine Untersuchung der generellen Funktionsweise des Testobjektes statt. Funktioniert dieses gemäß dem Konzept (s. Kapitel 4.3.2), kann es grundsätzlich funktional bestätigt werden („JA“ (J) oder „Nein“ (N)).
  - Laut Hoffmann (ebd.) sollen mit **Crash-Tests** mögliche Schwachstellen eines Software-Systems ermittelt und resultierende Überlastungen und deren Auswirkung getestet werden, wodurch die Robustheit des Systems gesteigert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das System, bestehend aus mehreren Anwendungen (s. Kapitel 4.3.2) untersucht. Durch eine gezielte Erhöhung der Datenmenge wurde ein Absturz herbeigeführt.
  - **Kompatibilitätstests** verfolgen nach Hoffmann (ebd.) das Ziel, verschiedene Verträglichkeitsaspekte zu überprüfen. Mögliche Hardware-Abhängigkeiten, Schnittstellenstandards und Einflüsse auf andere parallel betriebene Programme werden so überprüft. In dieser Arbeit wurden die jeweiligen Komponenten verknüpft und deren Verträglichkeit bezüglich Hardware-Erkennung und Softwarekompatibilität überprüft.

---

<sup>138</sup> Hoffmann 2008, S. 163

<sup>139</sup> Hoffmann 2008, S. 166

<sup>140</sup> Hoffmann 2008, S. 170–173

- Temporaler Test
  - Die Ausführungszeiten verschiedener Funktionen einer Software werden nach Hoffmann (ebd.) mit **Laufzeittests** überprüft. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Übermittlungsprozesse der einzelnen Komponenten des audiovisuellen Systems (Software und Hardware) hinsichtlich ihrer Laufzeit untersucht.
  - Nach Hoffmann (ebd.) wird bei **Stresstests** eine bewusste Überschreitung dieser spezifizierten Grenzbereiche generiert. Mit dem Ziel, dass realistische Belastungsgrenzen ausgelotet werden und um zu klären, ob bzw. wie das System nach dem Wegfall der Überlast wieder in den Normalbetrieb zurückfindet. In dieser Arbeit wurden diese Belastungsgrenzen über die Steigerung der zu analysierenden Kanaldaten in *Noise Image* (s. Kapitel 4.4.2) ermittelt.
- Operationale Tests
  - Um die Benutzbarkeit der Software zu überprüfen werden **Installations-, Ergonomie-** und **Sicherheitstests** durchgeführt. Da diese Art der Entwicklung nicht Teil dieser Arbeit ist wird auf eine detaillierte Ausführung dieser Begriffe verzichtet.

#### Prüfmethodik:

Da die Funktionalität und Latenz des audiovisuellen Systems immer optische Auswirkungen hat, ist eine visuelle Prüfmethodik entwickelt worden. Die Systemausgabe (vgl. Kapitel 4.3.3) wird mittels einer Testkamera erfasst, wobei das auslösende Ereignis (emittierendes Objekt) und das daraus resultierende Ergebnis (Systemausgabe) immer gemeinsam im Bildausschnitt der Kamera sichtbar sind, um später in einer Filmbearbeitungssoftware Auswertungen vornehmen zu können (s. Abbildung 28). Die messbare Mindestgröße war hierbei die Bildwiederholfrequenz der Kamera, welche bei 25 Bildern pro Sekunde (0,04 s) lag und somit über der Frequenz der für das menschliche Auge noch wahrnehmbaren Einzelbildern <sup>141</sup> (vgl. Kapitel 2.1.3). Die Grenzfrequenz dieses Effekts, welche aus Standbildern eine vorgetäuschte Bewegung erzeugt, liegt bei 20 Bildern pro Sekunde (0,05 s)<sup>142</sup>. Somit konnten im Versuchsaufbau optische Verzögerungen der Visualisierung ausreichend genau erfasst werden. Mittels dieser optischen Prüfmethodik wird die *optische Zeit* ( $t_0$ ) ermittelt. Eine weitere Prüfmethodik ist die digitale Messung der Übermittlungszeit von Daten innerhalb des erstellten Netzwerks mithilfe der Pingzeit (s. Kapitel 4.4.2). Die ermittelte Zeit wurde als *digitale Zeit* ( $t_D$ ) ausgewiesen. Die

---

<sup>141</sup> Dudek 2007, S. 28

<sup>142</sup> Dudek 2007, S. 28

Auslastung der Computer wurde anhand der maximalen Belastung der Prozessoreinheiten (CPU) und des Arbeitsspeichers (RAM) überprüft.

Um die gesamten Abläufe des audiovisuellen Systems zu ermöglichen, mussten alle Komponenten auf ihre Funktion und Leistungsfähigkeit überprüft werden. Besondere Aufmerksamkeit bei den Tests lag dabei auf der Akustischen Kamera und deren Einbindung in die Software der Visualisierung. Dies kann einerseits durch den Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit, der Entwicklung eines Systems zur visuellen Wiedergabe akustischer Signale, und andererseits durch die unkonventionelle Anwendung der Akustischen Kamera begründet werden. Das Messsystem ist für andere Anwendungsbereiche entwickelt und die Schwerpunkte und Qualitätsmerkmale der Software liegen nicht zwangsläufig im Arbeitsbereich dieses Projektes (vgl. Kapitel 6).



*Abbildung 28: Versuchsaufbau mit Sphere-Array aus Sicht der Testkamera, Quelle: Eigene Darstellung*

### **Übertragung des Testverfahrens auf das entwickelte System**

Um Ereignisse oder mögliche Probleme exakt zuordnen zu können, mussten alle Komponenten isoliert getestet und deren Integrationsfähigkeit ermittelt werden. Hierfür wurden vorab die jeweiligen Tests für die Komponenten und deren Methodik bestimmt (s. Tabelle 1).

Test Nr.	Komponente	Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik
1	Netzwerk	Unit/Integration	Funktional/Temporal/ Kompatibilität	Optisch/digital
2	Computer	Unit/Integration	Funktional/Temporal	Optisch/digital
3	Noise Image 4.7	Unit	Funktional/Temporal	Optisch
4	Processing	Unit	Funktional/Temporal	Optisch
5	Resolume Arena 5	Unit	Funktional/Temporal	Optisch
6	Mikrofon Arrays	Unit	Funktional/Temporal	Optisch/digital
7	System	System/Integration	Funktional/Temporal	Optisch

Tabelle 1: Übersicht der Testverfahren

Der Versuchsaufbau variierte, da eine einheitliche Anordnung nicht bei allen Versuchen notwendig war. Die Tests 1-5 wurden aus organisatorischen Gründen in einem Nebenraum, also nicht im vorgesehenen Vorführraum durchgeführt, was jedoch keinen Einfluss auf die Messergebnisse hatte.

#### 4.4.2. Durchführung

##### **Test 1 – Netzwerk:**

Es soll getestet werden, ob zwischen den Komponenten Computer 1, Akustische Kamera und Computer 2 (s. Abbildung 29) ein Netzwerk aufgebaut werden kann und ob diese Art der Kommunikation den in Kapitel 4.2 definierten Anforderungen entspricht.

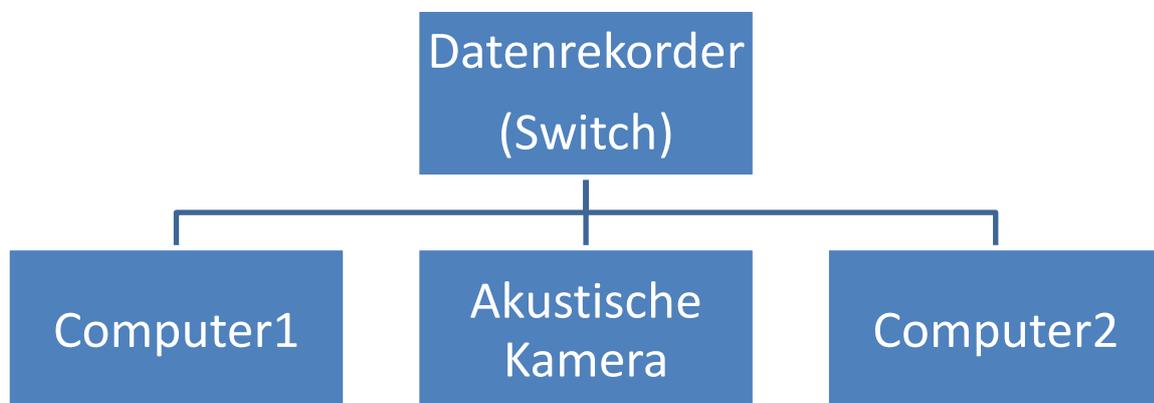


Abbildung 29: Verbindung der Komponenten im Netzwerk - Eigene Darstellung

Aufbau:

Alle Geräte wurden wie in Abbildung 29 mittels Ethernet-Kabel verbunden. Die Leistungsfähigkeit des Netzwerks zwischen den Computern ist, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, von den einzelnen Komponenten abhängig. Um die maximale Bandbreite zu ermitteln, mussten vorab alle Netzwerk-relevanten Komponenten und deren maximale Durchlaufgeschwindigkeit ermittelt werden.

- Switch des Datenrekorders            1Gbit/s <sup>143</sup>
- LAN-Kabel                                1Gbit/s (ebd.)
- Computer1                                1Gbit/s <sup>144 145</sup>
- Computer2                                1Gbit/s <sup>146</sup>

Die Netzwerkprotokolle an Computer1 und Computer2 wurden für die Nutzung der Akustischen Kamera eingestellt und mit statischen IP-Adressen versehen. <sup>147</sup>

Um zu überprüfen ob eine Verbindung zwischen den Geräten in einem Netzwerk besteht, wurde die Pingzeit gemessen <sup>148</sup>. Die Pingzeit ist die exakte Zeit, welche ein Datenpaket zwischen dem Aussenden einer Aktion und dem Empfang des Antwortsignals in einem Netzwerk benötigt. Dieses Antwortzeitverhalten unterscheidet sich jedoch von der eigentlichen Latenz in einem Netzwerk, da die Latenz nicht nur die Transferzeit, sondern die gesamte Zeit vom Aussenden bis zum Empfang beschreibt. <sup>149</sup>

Die Verbindung konnte hergestellt und die Pingzeit erfolgreich ermittelt werden. Eine Kommunikation zwischen *SpoutCapture* und *Resolume* herzustellen war dagegen nicht möglich. Eine Recherche hat ergeben, dass die Anwendung *TCPSpout* den Netzwerkdienst *Bonjour* von Apple verwendet um IP-Adressen zu verwalten <sup>150</sup>. *Bonjour* benutzt ein *DNS* (*Domain Name System*) <sup>151</sup>, was „ein Protokoll zur Namensauflösung von Domainnamen zu IP-Adressen [ist]“ <sup>152</sup>. Eine Voraussetzung für DNS ist ein „Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)“ <sup>153</sup>, was die Netzwerkeinstellungen in einem LAN automatisiert dynamisch vergibt <sup>154</sup>.

---

<sup>143</sup> Kerscher 2016

<sup>144</sup> Intel® o.J.

<sup>145</sup> Lenovo® 2016, S. 1

<sup>146</sup> CBS Interactive o.J.

<sup>147</sup> Kerscher 2016

<sup>148</sup> Baun 2015, S. 200

<sup>149</sup> ITWissen 2014

<sup>150</sup> TECHLIFE SG Pte.Ltd. 2016

<sup>151</sup> Apple Inc. 2015

<sup>152</sup> Baun 2015, S. 169

<sup>153</sup> Baun 2015, S. 172

<sup>154</sup> Baun 2015, S. 173

Um eine Verbindung zwischen den sich im Netzwerk befindlichen Komponenten herzustellen war eine einheitliche Netzwerk-Konfiguration nötig <sup>155</sup>. Jedoch ist der Auslieferungszustand des Datenrekorders der akustischen Kamera laut Krischker <sup>156</sup> (vgl. Kapitel 9.1) eine „gewollt-statische Konfiguration [...] aus sicherheitskritischen Gesichtspunkten“.

Ergebnis:

Zwar war eine Verbindung der Komponenten und somit auch eine Laufzeit messbar (s. Tabelle 2), jedoch waren die Komponenten auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen der Netzwerkprotokolle nicht kompatibel.

Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik	J/N	t <sub>D</sub>
Unit	Laufzeit	Pingzeit	-	0,01
	Funktionstest	Pingzeit	J	-
Integration	Kompatibilität	-	N	-
	Funktionstest	-	N	-

Tabelle 2: Test 1

Somit war eine Integration des Datenrekorders in das Netzwerk von Computer1 und Computer2 nicht möglich, woraufhin der technische Aufbau modifiziert werden musste.

Die Transformation der Bildinhalte von *Noise Image* zu *Resolume* sollte nicht mehr wie vorgesehen über das Netzwerk stattfinden. Stattdessen sollten beide Programme von Computer1 ausgeführt werden, woraufhin auf die Verwendung von *TCPSpout* für den Netzwerk-Bildtransfer verzichtet werden konnte.

### **Test 2 - Computer:**

Die Modifikation des technischen Aufbaus (s. Test 1) bedeutet eine zusätzliche Belastung für Computer1. Die Hardware des Computers ist eine mögliche Begrenzung der Ausgabeleistung. Werden einzelne Berechnungen nicht schnell genug vollzogen, kommt es zwischen Eingangssignal und Ausgangssignal zu einer Verzögerung, welche „rechnerische Latenz“ genannt wird <sup>157</sup>. Da ein möglicher Ausfall oder Absturz des Computers im Live-Betrieb zu verhindern ist, wurde ein Last-, Stress- und Crashtest durchgeführt. Daher wurde die Kartierungs-Auflösung und Filtereinstellungen in *Noise Image* teilweise höher gewählt als notwendig, um das Verhalten der einzelnen Programme und des Computers zu überprüfen. Testkriterium war neben der Auslastung der Prozessoren und des Arbeitsspeichers auch das optische Ausgangssignal auf einem Test-Display.

<sup>155</sup> Baun 2015, S. 33

<sup>156</sup> Detlef Krischker 2016, S. 2

<sup>157</sup> ITWissen.info 2016

Testobjekt ist ein ThinkPad P50 von IBM mit folgenden Rechnerdaten:

- CPU
  - 8 x i7, 3.6 GHz
- Grafikkarte
  - Intel HD Graphics 530 + NVIDIA Quadro® M1000M (4GB Memory)
- Arbeitsspeicher
  - 32GB
- Netzwerkadapter
  - Intel Ethernet Connection I219-LM (1Gbps)

Um eine realistische Soll-Belastung zu schaffen, wurden folgende Programme genutzt:

- Noise Image
  - Die Akustische Kamera wurde auf zwei Lautsprecher gerichtet und Noise Image mit allen nötigen Modulen gestartet. Abstand und Position des Arrays entsprachen nicht dem Konzept, da deren Einhaltung nicht testrelevant war. Da die Einstellungen in Noise Image für die Rechenleistung entscheidend sind, mussten diese während des Tests verändert werden um die Belastung des Computers zu überprüfen. Ziel war es, eine synchrone Darstellung des visualisierten Schalls zu erreichen, welche möglichst den Funktionen des Konzepts entspricht. Für den Stress- und Crashtest wurde das zu analysierende Spektrum der Kanaldaten soweit erhöht, dass auch eine Überlastung und ein Absturz des Computers Bestand des Tests war.
- Processing
  - Die Anwendungen *SpoutCapture* und *SpoutGrid* wurden gestartet und deren aufzeichnendes Fenster auf die Größe des Fensters *Foto-2D* in *Noise Image* angepasst.
- Spout
  - Die Anwendung *SpoutReceiver* wurde gestartet.
- Resolume Arena 5
  - Eine Visualisierung mit dem übermittelten Bildinhalt wurde gestartet. Wie im Konzept vorgesehen, wurden perspektivisch verzerrte Projektionen integriert.

Zusätzlich wurde ein dritter Monitor angeschlossen um den Computer und dessen Grafikkarte wie im Live-Betrieb zu belasten. Alle Programme wurden gestartet und die Kommunikation zwischen Resolume und Noise Image hergestellt. Um die zeitliche sowie lokale Synchronität des Ausgangssignals zu überprüfen, wurde als Testsignal eine Sprachaufnahme verwendet, welche im ständigen Wechsel zwischen dem linken und rechten Kanal abgespielt wurde.

Ergebnis:

Selbst nach dem Einstellen sehr leistungsintensiver Parameter in *Noise Image*, wurde das Potential der Prozessoren und des Arbeitsspeichers nicht vollständig ausgenutzt. Die Prozessor-Einheiten wurden beim Stresstest maximal bis etwa 80% belastet. Eine optische Asynchronität wurde jedoch bei Einstellungsänderungen in *Noise Image* sichtbar, was auf die Komplexität des Algorithmus, nicht aber auf eine Überlastung des Computers rückschließen lässt. Der Crash-Test zeigte, dass das System, wenn eine zu große Datenmenge im Live-Modus interpretiert werden musste, nicht mehr in den Normalmodus zurückfindet und ein Neustart des Computers erforderlich war.

Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik	t <sub>0</sub>	CPU	RAM	J/N
Unit	Lasttest	Optisch	0,48	57 %	35%	-
	Stresstest	Optisch	2,24	80 %	37%	-
	Crash-Test	Optisch	X	~90 %	44%	-
Integration	Funktion	-	-	-		J
	Kompatibilität	-	-	-		J

Tabelle 3: Test 2

### **Test 3 - Noise Image:**

Jeder Berechnungsschritt einer Software benötigt eine gewisse Zeit um vollzogen und weitergeleitet zu werden. <sup>158</sup>

Im Zuge der stetigen Verbesserung und Weiterentwicklung von technischen Komponenten und Software ist in der Software-Entwicklung jedoch die Ausführungszeit von Funktionen heutzutage von geringerer Bedeutung. Immer öfter bekommt die algorithmische Komplexität einer Software eine bedeutendere Rolle als die gemessene Bearbeitungszeit von einzelnen Funktionen. <sup>159</sup>

In diesem Test sollte das Laufzeitverhalten von *Noise Image* untersucht werden. Untersucht wurde bei diesen Tests die optische Verzögerungszeit  $t_0$ , welche mithilfe der Testkamera ermittelt wurde.

Aufbau:

Als Test-Array wurde das Ring-Array mit 48 Mikrofonen verwendet. Der Computer (Computer1) mit *Noise Image 4.7* und die Akustische Kamera wurden so platziert, dass ein weiterer Computer (Computer3) in 1.3 m Entfernung mit zwei externen Lautsprechern

<sup>158</sup> Hoffmann 2008, S. 7

<sup>159</sup> Hoffmann 2008, S. 128

gut sichtbar war. Um die Laufzeit zu ermitteln, wurde von Computer3 ein akustisches und visuelles Signal synchron abgespielt. Das akustische Signal wurde über das Array an Computer1 geleitet, von *Noise Image* verarbeitet und das akustische Foto an einen weiteren Monitor ausgegeben. Dieser Monitor wurde hinter Computer3 positioniert, wodurch das auslösende Ereignis und die System-Ausgabe für die Test-Kamera sichtbar waren. Anschließend konnte anhand des Videos die zeitliche Differenz zwischen dem visuellen Testsignal und des Erscheinens des akustischen Fotos in einer Filmbearbeitungssoftware errechnet werden.

Dieser Test wurde mit verschiedenen Einstellungen in *Noise Image* wiederholt, um die Auswirkung verschiedener Parameter zu ermitteln. Getestete Parameter waren das Frequenzspektrum ( $s_F$ ) und zwei unterschiedliche Modi des Kartierungs-Algorithmus *Streaming* (St) und *Simpel Preview* (SP).

Ergebnis:

Eine Vergrößerung des Frequenzspektrums hatte auf Grund der Zunahme an Daten eine direkte Auswirkung auf die Laufzeit, jedoch sind die ermittelten Zeitwerte nicht korrelativ, da die Datenmenge einer Frequenz immer abhängig vom gemessenen Signal ist. Der Test zeigte aber einen deutlichen Unterschied zwischen *Streaming* und *Simpel Preview*.

Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik	$s_F$	Modus	CPU	$t_o$
Unit	Laufzeittests	Optisch	500Hz	ST	46%	0,38
				SP	40%	0,36
	Laufzeittests	Optisch	750Hz	ST	55%	0,44
				SP	53%	0,32
	Laufzeittests	Optisch	1kHz	ST	67%	0,72
				SP	59%	0,60

Tabelle 4: Test 3

#### **Test 4 - Processing**

Um das akustische Foto von *Noise Image* in *Resolume* zu sehen, muss das Signal einen Zwischenschritt vollziehen. Diese Weiterleitung kann ebenfalls Zeit in Anspruch nehmen und somit Auswirkung auf die Latenz des Gesamt-Systems haben.

Die Weiterleitung erfolgt mit der in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Open-Source-Anwendung *SpoutCapture*. Die Anwendung *SpoutGrid* funktioniert ähnlich wie *SpoutCapture*, ist jedoch durch die Umrechnung in eine dreidimensionale Matrix rechenintensiver. Die Parameter

bezüglich der Auflösung wurden im Quell-Code der Anwendung voreingestellt und beibehalten. Beide Anwendungen wurden jeweils einzeln und parallel getestet.

Aufbau:

Gemessen wurde wieder mit der Testkamera welche auf das Display von Computer1 gerichtet wurde. Auf der linken Seite des Displays wird dabei eine Filmsequenz, welche vom Capturing-Fenster aufgezeichnet wurde abgespielt. Auf der rechten Seite des Displays war die System-Ausgabe sichtbar. Die durch die Übertragung entstandene Verzögerung konnte anhand des Videos ermittelt werden.

Ergebnis:

Der Test hat ergeben, dass die Anwendung *SpoutGrid* eine geringere CPU- und RAM-Belastung aufweist als *SpoutCapture*. Die ermittelte Latenz ( $t_0$ ) stand in diesem Fall allerdings nicht im Verhältnis zur Auslastung des Computers, sondern variierte im Bereich von 0,08 Sekunden. Die parallele Nutzung löste eine zusätzliche Verzögerungszeit aus.

Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik	Anwendung	CPU	RAM	$t_0$
Unit	Laufzeittests	Optisch	SpoutCapture	30%	15%	0,28
			SpoutGrid	15%	14%	0,2
			SpoutCapture + SpoutGrid	50%	22%	0,32

Tabelle 5: Test 4

### **Test 5 - Resolume:**

Als Test-Anwendung wurde das gleiche Projekt verwendet wie bereits in Test 2. Um ein möglichst exaktes Messergebnis zu erlangen, wurde auch bei diesem Test ein externes Bildsignal mit *SpoutCapture* verwendet, da Signale welche von *Resolume* selbst ausgelöst werden, einer möglichen internen Ausführungsverzögerung unterliegen können <sup>160</sup>. Die mittels der Testkamera ermittelte Verzögerungszeit ( $t_{01}$ ) musste mit dem Ergebnis von *SpoutCapture* aus Test 4 ( $t_{02}$ ) subtrahiert werden um die diskrete Ausführungszeit ( $t_0$ ) von *Resolume* zu erhalten.

<sup>160</sup> Hoffmann 2008, S. 7

Aufbau:

Das Test-Projekt wurde in *Resolume* ausgeführt und *SpoutCapture* gestartet. Die Ausgabe von *Resolume* erfolgte auf einem externen Monitor (Monitor2). Das Display (Monitor1) des Computers und Monitor2 sind im Bildausschnitt der Testkamera gut sichtbar.

Um ein Test-Filmausschnitt für *SpoutCapture* sichtbar zu machen, wurde *Resolume* im Hintergrund ausgeführt, wobei die Ausgabe des Programms auf Monitor2 erhalten blieb. Der Test-Film ist nun im Original auf Monitor1 und mit allen Bearbeitungen, Animationen und perspektivischen Verzerrungen auf Monitor2 sichtbar.

Ergebnis:

Die Laufzeit von *Resolume* ist messbar, hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Darstellung.

Prüfebene	Prüfkriterium	Prüfmethodik	t <sub>01</sub>	t <sub>02</sub>	t <sub>0</sub>
Unit	Laufzeittests	Optisch	0,36	0,28	0,08

Tabelle 6: Test 5

### **Test 6 – Mikrofon Arrays**

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Mikrofon-Array-Modelle wurden bereits in Kapitel 3.4.1 beschrieben. In diesem Test sollten die Modelle auf ihre unterschiedlichen Merkmale und deren mögliche Auswirkung auf das Laufzeitverhalten von Noise Image untersucht werden.

Besonders die „Rückwärts-Dämpfung“ des Sphere-Arrays sollte bei diesem Test untersucht werden (s. Kapitel 3.4.1), da durch Schallreflexionen Phantomquellen entstehen könnten und somit eine präzise Lokalisierung eventuell nicht mehr gegeben wäre.

Das Laufzeitverhalten wurde wie in bereits vorrausgegangenen Tests mit Hilfe der Testkamera ermittelt. Testsignal hierfür war ein audiovisueller Impuls eines Videos.

Um die Messung frequenzunabhängig zu halten, wurde als akustisches Testsignal ein *Impuls*, ein 1000Hz *Sinus*-Ton, ein Testsignal mit *weißem Rauschen* und ein abwechselnd aus dem rechten und linken Lautsprecher (*L+R*) gespieltes Signal verwendet.

Die Evaluierung der Genauigkeit der Lokalisierung einer Schallquelle erfolgte visuell an einem Display und wurde in den drei Kategorien *gut*, *mittel* und *schlecht* bewertet. Da die Datenmenge bei einer Messung im Live-View eingeschränkt werden muss um die

Berechnungszeit gering zu halten, wurde ein Frequenzspektrum von ca. 700Hz eingestellt (s. Abbildung 30).

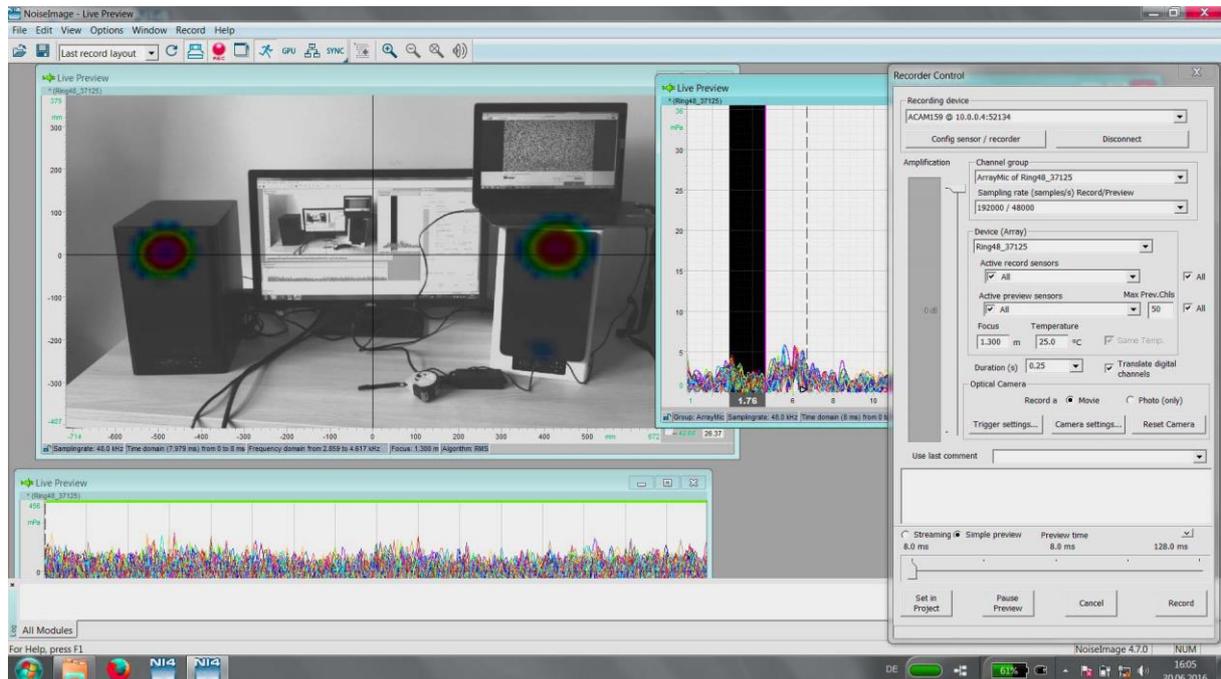


Abbildung 30: Screenshot einer Messung, Lokalisierung bei weißem Rauschen, Quelle: Eigene Darstellung

#### Aufbau:

Die beiden Lautsprecher wurden im Abstand von 1m zueinander aufgestellt um ein diskretes Ergebnis zu erhalten. Ein weiterer Computer (Computer3) und ein externer Monitor von Computer1 wurden zwischen den Lautsprechern positioniert, wodurch die akustische Kartierung von Noise Image und das audiovisuelle Signal im Bildausschnitt der Testkamera zu sehen war. Die Arrays wurden einzeln getestet und jeweils mit einem Abstand von 1,3m zur Schallquelle aufgestellt.

#### Ergebnis:

Deutliche Unterschiede waren bezüglich der Lokalisierung in Abhängigkeit des Testsignals erkennbar. Wie der Tabelle 7 zu entnehmen ist, konnte ein impulsartiges Testsignal im *Live-View* schlechter lokalisiert werden. Die Schallquelle wurde diffus an den Wänden des Raumes angezeigt, was mit dem Reflexionsverhalten des Schalls zusammenhängen kann. Auch zu erkennen ist eine geringere Verzögerungszeit des Ring-Arrays mit nur 32 Mikrofonen. Die Lokalisierung von Schallquellen der Arrays mit 48 Mikrofonen war jedoch detaillierter.

Array	Testsignal	Lokalisation	$t_0$
Ring 32	Impuls	schlecht	0,32
	Sinus	mittel	0,24
	W.rauschen	gut	0,28
	L+R	mittel	-
Ring 48	Impuls	mittel	0,28
	Sinus	mittel	0,32
	W.rauschen	gut	0,24
	L+R	gut	-
Sphere 48	Impuls	Schlecht	0,36
	Sinus	Mittel	0,36
	W.rauschen	Gut	0,32
	L+R	Mittel	-

Tabelle 7: Test 6

### Test 7 – System

Alle Komponenten des Systems wurden auf ihre Funktion und Eigenschaften getestet. Die ermittelten Ergebnisse der bereits durchgeführten Tests führten teilweise zu Änderungen (vgl. Test 1) des in Kapitel 4.3.2 beschriebenen technischen Aufbaus. Da bisher nur Test-Signale verwendet wurden, musste das System unter Bedingungen getestet werden wie sie bei einer Live-Anwendung vorherrschen würden. Dafür wurde das System nach dem entwickelten Konzept im Vorführraum aufgebaut und mit Musikern getestet.

#### Aufbau:

Die Positionierung der Musiker wurde so gewählt, dass die Mikrofon-Arrays auf die in Kapitel 4.3.4 beschriebene reflexionsarme Fläche gerichtet wurden um eine verbesserte Lokalisierung der Schallquellen zu erhalten. Um alle Musiker ganzflächig im Messbereich zu halten war das Array der akustischen Kamera mit einem Abstand von 4,5m vor den Musikern und auf einer Höhe von 1,2m positioniert. Test-Array waren das Ring-Array 48 und das Kugel-Array *Sphere 48*. Das Array *Ring 32 AC Pro* war auf Grund der Eigenschaften (Grenzfrequenz und Mess-Distanz) für den Test nicht geeignet. Als Ausgabegerät wurde ein LCD-Projektor mit geringem Abstand zum Array aufgestellt, da beide möglichst dieselbe Perspektive haben sollten.

Die Musiker, bestehend aus drei Gitarristen, einem Bassist, drei Sänger/innen und einem Kachon, spielten mehrere Stücke mit einem breiten Frequenzspektrum. Auf die grafische Modifikation durch *SpoutGrid* muss aus zeitlichen Gründen verzichtet werden.

Ergebnis:

Bereits beim Stimmen der Instrumente war ersichtlich, dass durch die hohe Frequenzbreite der Schallereignisse und die Anzahl der Musiker die Differenzierbarkeit für die Akustische Kamera im Live-Modus erschwert wurde. Da daraufhin das Signal gefiltert werden musste um die Datenmenge zu reduzieren, war beispielsweise die Bass-Gitarre nicht mehr in der Kartierung zu sehen. Die Anzahl der Musiker musste im Laufe des Tests auf Gitarre, Gesang und Kachon reduziert werden. Auch das Kachon wurde nur selten differenziert dargestellt.

Das Array Ring 48-75 erzielte eine präzisere Lokalisierung der Schallquellen als das Kugel-Array. Die Positionierung des Projektors musste im Laufe des Tests geändert werden, da das Geräusch des Lüfters Einfluss auf die Messergebnisse hatte und daher eine Position unterhalb des Arrays gewählt wurde.

Der Aufbau des Systems mit Projektor und Mess-Einheit funktionierte ohne Ausfälle, jedoch konnte die Kartierung nicht synchron dargestellt werden.



Abbildung 31: System-Test, Musiker mit projizierter Kartierung, Quelle: Eigene Darstellung

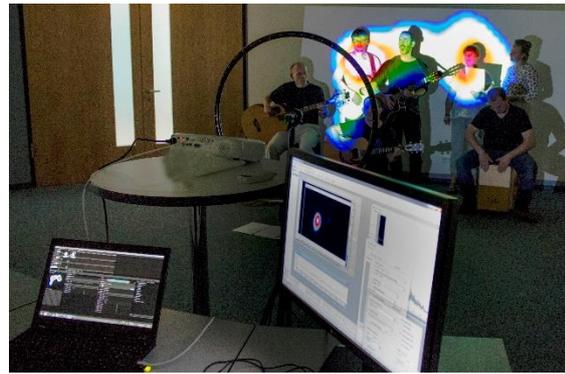


Abbildung 32: System-Test, Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung

#### 4.4.3. Zusammenfassung und Probleme

Die Tests haben ergeben, dass die Kommunikation via Ethernet auf Grund der Netzwerkprotokolle nicht umsetzbar war (s. Test 1). Zwar wäre eine Konfiguration des Datenrecorders mit Hilfe eines Firmen-Internen Entwicklers möglich, jedoch konnte dies aus zeitlichen und sicherheitstechnischen Gründen nicht umgesetzt werden.

Die daraus resultierende Änderung des Aufbaus bedeutete eine höhere Leistungsanforderung für den Computer, eine Überlastung bei einer Darstellung gemäß der Anforderungen (s. Kapitel 4.2) konnte jedoch nicht festgestellt werden (s. Test 2). Die Darstellung der Schallereignisse war jedoch in allen Tests um etwa 0,5s verzögert ausgegeben (s. Test 3). Unter den Anwendungen ist *Noise Image* die komplexeste und leistungsintensivste Einheit und somit Taktgeber des Systems. Durch den komplexen Algorithmus und dessen Bearbeitungszeit musste die Datenmenge spektral und temporal

eingeschränkt werden. Durch die im Live-Modus nötige Eingrenzung der Datenmenge in der Zeit-Achse, konnten impulsive Signale, auf Grund der Laufzeit des Bildaufbaus, teilweise nicht korrekt dargestellt werden.

Bezüglich der Mikrofon-Arrays konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der Mikrofone einen Einfluss auf die Verarbeitungszeit und somit auf die Latenz hat was auf die geringere Datenmenge rückschließen lässt (s. Test 6). Das Ring-Array mit 48 Mikrofonen stellte sich auf Grund der besseren Quell-Darstellung für die vorgesehenen Zwecke am geeignetsten dar. Ausschlaggebend für die Qualität der Lokalisation der Schallquellen war auch die räumliche Umgebung der Messeinheit. Die akustischen Bedingungen in dem Raum der Messungen waren nicht ausreichend dämmend um die Reflexionen des Schalls zu reduzieren, wodurch diese in das akustische Bild miteinbezogen wurden und somit das Ergebnis beeinflussten.

Bei dem System-Test (s. Test 7) haben sich die Anzahl und die Art der Schallereignisse als wichtige Einflussgröße herausgestellt. Impulsive Signale und akustische Überdeckung ergaben ein diffuses Schallbild.

## 5. Umsetzung der Entwicklung

Um eine beispielhafte Demonstration der audiovisuellen Live-Anwendung umzusetzen, wurde anhand der Testergebnisse und den im Laufe der Entwicklung erlangten Kenntnisse eine Live-Show für Filmaufnahmen produziert. Drehort war aus den in Kapitel 4.3.4 erwähnten versicherungstechnischen Gründen der Saal der Firma gfai tech GmbH.

### 5.1. Vorbereitung

Die Erkenntnisse aus dem System-Test haben verdeutlicht, dass eine Vielzahl von Schallquellen in einem Raum die Differenzierung für die Akustische Kamera erschwert (s. Kapitel 4.4.2, Test 7). Die Wahl der Schallquelle wird daher auf ein musizierendes Improvisations-Duett gelegt, bestehend aus einer Klarinettistin unter Begleitung eines Musikers mit einem selbst entwickelten MIDI-Controller mit integriertem Synthesizer. Da der Schallaustritt des Holzblasinstruments nicht ausschließlich durch den Schalltrichter, sondern auch aus den jeweils geöffneten Tonlöchern unter den Klappen austritt, sind Visuelle Effekte an unterschiedlichen Stellen des Instruments sichtbar, was die Wirkung der Schalltransformation in visuelle Signale veranschaulicht und die wahrnehmungspsychologischen Aspekte der Sinnesmodalität verdeutlicht (s. Kapitel 2.1.4). Da die Ausgabe des Synthesizers ein Lautsprecher und somit eine statische Schallquelle ist, wird mittels der modifizierten Darstellung durch *SpoutGrid* (s. Kapitel 4.3.2) virtuelle Räumlichkeit geschaffen, um einen gestalterisch ansprechenden

Effekt zu erzeugen. SpoutGrid wird auf eine weiße Fläche unterhalb des Lautsprechers projiziert und beinhaltet ausschließlich dessen akustische Kartierung (vgl. Abbildung 26).

Die Erkenntnisse aus den Array-Tests (s. Kap 4.4.2, Tests 6) haben gezeigt, dass für eine Live-Anwendung mit den räumlichen Gegebenheiten des in Kapitel 4.3.2 definierten technischen Aufbaus, das Mikrofon-Array *Ring 48-75 AC Pro* aufgrund der breiten Kartierungsfrequenz (s. Kapitel 3.4.1., S.19) und der geringen Fokusabhängigkeit (s. Abbildung 17) am besten geeignet ist. Der technische Aufbau wurde aus dem Systemtest (s. Kapitel 4.4.2) übernommen. Die Farbskala zur Darstellung des Schalldruckpegels in *Noise Image* (vgl. Kapitel 3.4.1, S.21) wird aus gestaltungstechnischen Aspekten auf einen Farbverlauf von blau zu gelb (min./max.) geändert, woraufhin auch die Berechnung der Tiefeninformation der Pixel in *SpoutGrid* im Quellcode (s. Kapitel 9.4) geändert werden muss. Des Weiteren wird, um die Einrichtung des Saals zu verkleiden und die Reflexion des Schalls einzudämmen, neben der Projektionsfläche Bühnen-Molton angebracht.

## 5.2. Umsetzung und Probleme

Da die Gegebenheiten leicht von den in den bereits durchgeführten Tests abwichen, musste das System erneut überprüft und angepasst werden.

Aus organisatorischen Gründen konnte nicht derselbe Mess-Computer wie im Testverfahren (s. Kapitel 4.4.2, S.41), sondern ein leistungsschwächeres Modell verwendet werden. Bei der Einrichtung der modifizierten Darstellung auf die zweite Bildebene, konnte die akustische Kartierung in *Noise Image*, auf Grund der hohen GPU-Beanspruchung, nur noch schwer aufgebaut werden, woraufhin auf die Anwendung *SpoutGrid* verzichtet werden musste. Der beispielhafte Einsatz der Anwendung wird jedoch in die Filmaufnahmen integriert.

Auch das Spektrum der Kanaldatenfilterung musste auf kleinere und tiefere Werte wie im Testlauf angepasst werden, was eine detaillierte Darstellung des Schallaustritts der Klarinette erschwerte (s. Kapitel 3.4.3).

Eindrücke der Umsetzung des Konzepts, sowie eine beispielhafte Demonstration von *SpoutGrid*, wurden in Form einer CD-Rom (s. Kapitel 9.3) an diese Arbeit angehängt.



Abbildung 33: Umsetzung der Entwicklung 01, Quelle: Eigene Darstellung

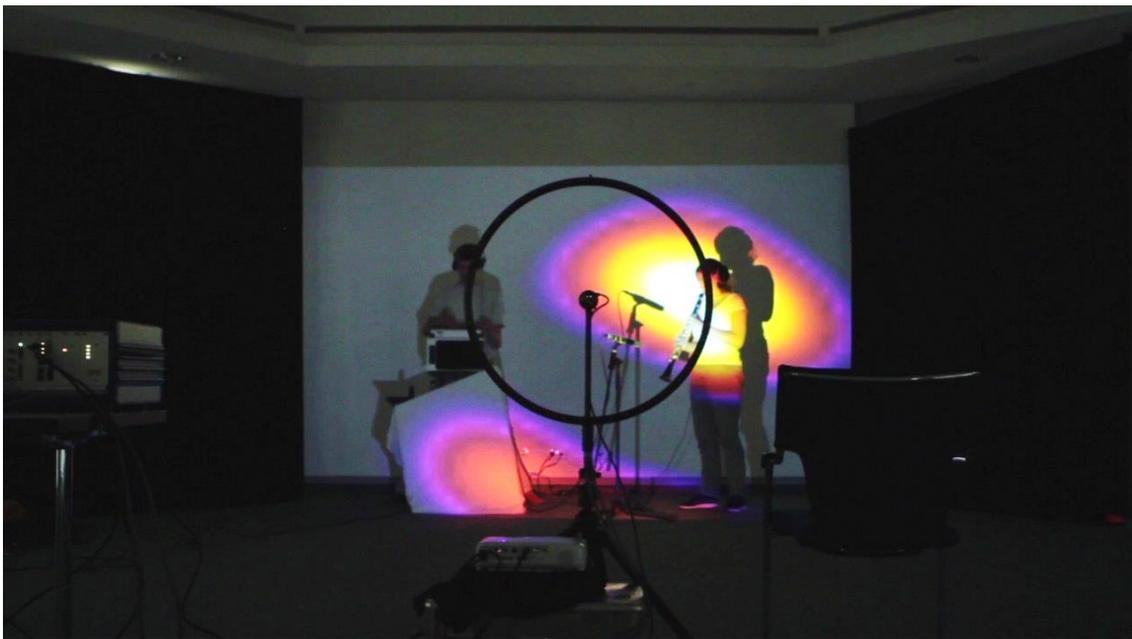


Abbildung 34: Umsetzung der Entwicklung 02, Quelle: Eigene Darstellung

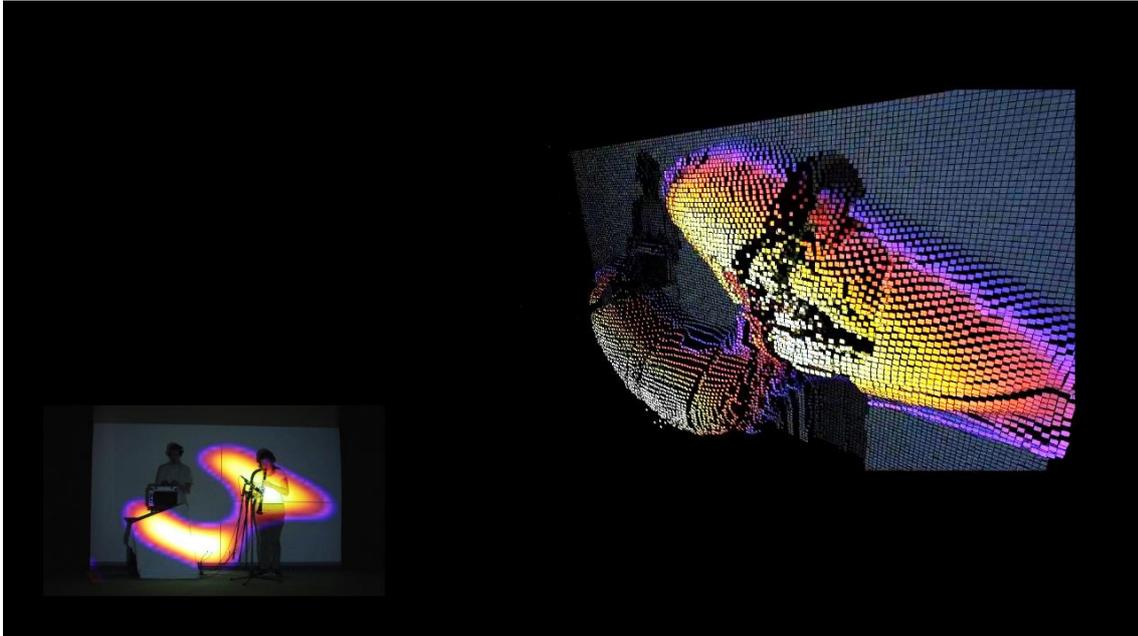


Abbildung 35: Umsetzung der Entwicklung 03, Quelle: Eigene Darstellung

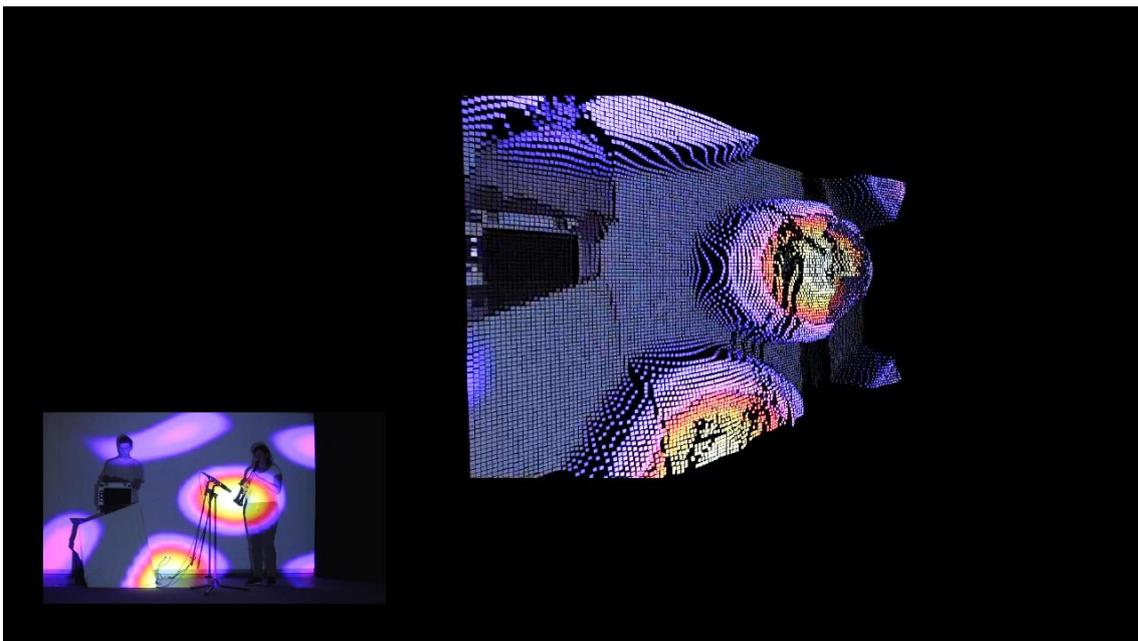


Abbildung 36: Umsetzung der Entwicklung 04, Quelle: Eigene Darstellung

## 6. Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Live-System zur optischen Wiedergabe auditiver Reize entwickelt und für die Produktion eines Musikvideos eingesetzt (s. Kapitel 9.3). Dabei konnten während der Entwicklung des Systems verschiedene Erkenntnisse hinsichtlich den Anforderungen, des technischen Aufbaus, der Hardware-/Softwareintegrität, der Kommunikation zwischen einzelnen Komponenten sowie der Ausgabe gewonnen werden.

Auf Grund der assoziativen Verknüpfung von Sinnesreizen der menschlichen Wahrnehmung (s. Kapitel 2.1.4), konnten darauf beruhend Anforderungen definiert und auf Grund der starken Kopplung von auditiven und visuellen Reizen, die Akustische Kamera als Entwicklungsgrundlage für ein audiovisuelles System konzeptioniert werden (s. Kapitel 4.2).

Die Ausarbeitung des technischen Aufbaus des Systems musste an die spezifischen Eigenschaften der Akustischen Kamera und der Beschaffenheit des Vorführraums angepasst werden (s. Kapitel 4.3.2). Besonders die Verwendung der Akustischen Kamera, in einem nicht dafür vorgesehenen Kontext (vgl. Kapitel 3.4.2), stellte bezüglich des Signalfusses eine konzeptionelle Herausforderung dar (s. Kapitel 4.3.3).

Bezüglich der Überprüfung des Systems konnte gezeigt werden, dass die Kommunikation in einem Netzwerk, auf Grund sicherheitstechnischer Aspekte bestimmter Hardwarekomponenten, nicht funktioniert (vgl. Kapitel 4.4.2, S.39). Außerdem konnte belegt werden, dass die jeweils zusätzlich verwendeten Anwendungen *SpoutCapture*, *SpoutGrid* und *Resolume*, bezüglich der Laufzeit des Systems, geringen Einfluss haben (vgl. Kapitel 4.4.2, Test 3-5). Die Summierung der Laufzeiten hat jedoch Auswirkung auf die Synchronität der Ausgabe, sowie die Leistungsfähigkeit des Computers, welche durch die höhere Belastung stark beeinflusst wird (vgl. Kapitel 4.4.2, S.41). Des Weiteren stellte sich heraus, dass die Akustische Kamera im Live-Betrieb Schallereignisse gut abbildet, jedoch trotz guter Performanz des Computers einer zeitlichen Verzögerung unterlegen ist (vgl. Kapitel 4.4.2, S.43). Der Bild-Transfer sowie die grafische Modifizierung mittels Open-Source-Programmen konnte im Einzelnen funktionsfähig umgesetzt werden, jedoch auf Grund von zu hoher Leistungsanforderung an den Computer nicht in die Live-Anwendung integriert werden.

Allgemein konnte das System zur Transformation akustischer in visuelle Signale mittels der Akustischen Kamera funktionsfähig umgesetzt werden. Außerdem war es möglich die visuellen Akzente der Schallquelle zuzuordnen, sowie den variierenden Austritt des Schalls an der Klarinette zu zeigen (s. Abbildung 34) Allerdings besteht bezüglich der detaillierten Darstellung von Geräuschen Verbesserungsbedarf, was durch den Einsatz leistungsfähigerer Computer erreicht werden kann.

Hinsichtlich der Forschungsfragen dieser Arbeit konnte anhand des beispielhaft umgesetzten Systems gezeigt werden, dass es möglich ist, visuelle Signale durch akustische Signale zu steuern beziehungsweise akustische Signale visuell darzustellen. Die technischen Voraussetzungen, welche das umgesetzte System zu erfüllen hatte, lassen sich mit den in Kapitel 4.2 generierten Anforderungen in Einklang bringen. Jedoch kann keine generelle Aussage bezüglich interaktiver Systeme zur visuellen Wiedergabe akustischer Signale getroffen werden. Technische Voraussetzungen solcher Systeme oder Möglichkeiten der Steuerung und Manipulation der visuellen Wiedergabe müssen individuell für jedes betroffene System betrachtet werden.

Ein mögliches Einsatzgebiet eines derartigen audiovisuellen Systems wird durch das umgesetzte musikalische Projekt gezeigt. Dieses ist einem künstlerischen Bereich zu zuordnen.

## 7. Ausblick

Es ist vorstellbar, dass zukünftige Systeme hinsichtlich der Latenz und der Auflösung der Darstellung optimiert werden (können), wodurch praktische Anwendungen im Live-Bereich vorstellbar sind. Beispielsweise kann unter anderem die Visualisierung von Chören, Orchestern, Theaterinszenierungen oder Stadiongesängen als Stilelement integriert werden und bietet Möglichkeiten der interaktiven Licht-Gestaltung von Veranstaltungen. Der grafischen Modifizierung, wie in dieser Arbeit beispielhaft eingesetzt, sind dabei keine Grenzen gesetzt.

Besonders die Transformation von auditiven in visuelle Sinnesreize könnte für Menschen mit beeinträchtigtem Gehör von größerer Bedeutung sein. Mittels des Systems könnten einerseits musikalische Inszenierungen visuell erfahrbar werden, andererseits könnten im Bereich der Unfallverhütung an Arbeitsplätzen Systeme eingesetzt werden, welche visuelle Warnsignale auf ausschließlich auditiv wahrnehmbare Gefahrenquellen projizieren.

Allerdings ist dabei wahrscheinlich, dass Computer mit deutlich leistungsfähigeren Grafikprozessoren eingesetzt werden müssen als die im Rahmen dieser Arbeit verfügbar waren, um die Darstellungsqualität und die Laufzeit des Systems zu verbessern. Auch eine Optimierung des Signalfusses, also die Reduzierung von zusätzlicher Software, könnte beispielsweise durch die direkte Implementierung eines Senders in *Noise Image* zu deutlich besseren Ergebnissen führen.

## 8. Literaturverzeichnis

Apple Inc. (2015): Bonjour: Sicherheitshinweise für Entwickler und Administratoren. Online verfügbar unter <https://support.apple.com/de-de/HT205195>, zuletzt aktualisiert am 29.09.2015, zuletzt geprüft am 20.07.2016.

Baun, Christian (2015): Computernetze kompakt. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (IT kompakt). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-46932-3>.

Benjamin O. Orndorff (2016): Was ist der Unterschied zwischen Hubs, Switches, Routern und Zugriffspunkten? Microsoft Corporation. Online verfügbar unter <http://windows.microsoft.com/de-de/windows/hubs-switches-routers-access-points-differ#1TC=windows-7>, zuletzt aktualisiert am 20.05.2016, zuletzt geprüft am 21.07.2016.

Brown, Michael; Majumder, Aditi; Yang, Ruigang (2005): Camera-Based Calibration Techniques for Seamless Multi-Projector Displays. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 11 (2), S. 193–206.

CBS Interactive (o.J.): Lenovo IdeaPad U530 Touch Specs. Online verfügbar unter <http://www.cnet.com/products/lenovo-ideapad-u530-touch-59401453-silver-weekly-deal-4th-generation-intel-core-i7-4500u-1-8-ghz-200-mhz-4mb/specs/>, zuletzt aktualisiert am 12.08.2016, zuletzt geprüft am 12.08.2016.

Detlef Krischker (2016): Informationen zu Datenrekorder mcdRec. Stuttgart, Berlin, 29.07.2016. eMail (s. Anhang ) an Micha Mäckle.

dict (2016): dict.cc Wörterbuch :: Programmiergerüst :: Deutsch-Englisch-Übersetzung. Unter Mitarbeit von Paul Hemetsberger. Wien. Online verfügbar unter <http://www.dict.cc/deutsch-englisch/Programmierger%C3%BCst.html>, zuletzt geprüft am 09.08.2016.

Dudek, Mark (2007): Entwurfsatlas Schulen und Kindergärten. Basel: De Gruyter (Entwurfsatlanten), zuletzt geprüft am 29.07.2016.

Effenberg; Alfred O. (2007): Wahrnehmung und Bewegung. Aktuelle Facetten der Wahrnehmungs-Handlungsforschung und Implikationen für die Bewegungspraxis. In: *motorik* 30 (4), S. 185–193.

Elektronik Kompendium (2016): LAN - Local Area Network. Unter Mitarbeit von Patrick Schnabel. Online verfügbar unter <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/net/0904021.htm>, zuletzt aktualisiert am 21.05.2016, zuletzt geprüft am 23.06.2016.

Engström, A.; Esbjörnsson, M.; Juhlin, O. (2008): Nighttime visual media production in club environments, zuletzt geprüft am 08.07.2016.

Erlhoff, Michael; Marshall, Tim (2008): Wörterbuch Design. Begriffliche Perspektiven des Design. Basel: Birkhäuser Verlag AG (Board of International Research in Design). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8142-4>.

Erpenbeck, John; Sauter, Werner (Hg.) (2013): So werden wir lernen! Kompetenzentwicklung in einer Welt fühlender Computer. s.l.: Springer Berlin Heidelberg.

Essaian, Stepan; Khaydarov, John (2012): State of the Art of Compact Green Lasers for Mobile Projectors. In: *Optical Review* 19 (6), S. 400–404.

Fleischmann, Monika; Strauss, Wolfgang (2008): Interaktive Kunst als Reflektion medialer Entwicklung. In: *Informatik-Spektrum* 31 (1), S. 12–20. DOI: 10.1007/s00287-007-0208-y.

Friedrich, Hans J. (Hg.) (2008): Tontechnik für Mediengestalter: Töne hören - Technik verstehen - Medien gestalten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Gfai tech GmbH (2015): Brochure - Acoustic Camera. Listening with your eyes. Gfai tech GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.acoustic-camera.com/en/support/downloads/brochure.html>, zuletzt geprüft am 26.07.2016.

Gfai tech GmbH (2016): acoustic-camera. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.acoustic-camera.com/>, zuletzt geprüft am 11.07.2016.

Giard, M. H.; Peronnet, F. (1999): Auditory-Visual Integration during Multimodal Object Recognition in Humans: A Behavioral and Electrophysiological Study. Mental Processes and Brain Activation, INSERM-U280, Lyon, France. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 11 (5). Online verfügbar unter <http://cognitrn.psych.indiana.edu/busey/eegseminar/pdfs/fromJeremy/Giard%20&%20Peronnet%20-1999-%20AV%20integration%20in%20ERP.pdf>, zuletzt geprüft am 09.06.2016.

Goldstein, E. Bruce (2001): Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung. 2. Nachdr. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. (Spektrum-Lehrbuch).

Gundlach, Axel (2013): Wirkungsvolle Live-Kommunikation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, zuletzt geprüft am 12.08.2016.

Hartmann, Dieter (2012): Audiovisuelle Shows gestalten und präsentieren. Das HDAV-Buch für die Praxis. 1. Aufl. Münster: fotoforum-Verl.

Hasche, Eberhard; Ingwer, Patrick (2016): Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion. Theorie und Praxis für Film, Video und Fernsehen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (X.media.press), zuletzt geprüft am 26.08.2016.

Haug, Andrea (2012): Multisensuelle Unternehmenskommunikation. Erfolgreicher Markenaufbau durch die Ansprache aller Sinne. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, zuletzt geprüft am 12.07.2016.

Heinecke, Andreas M. (2012): Mensch-Computer-Interaktion. Dordrecht: Springer (X.media.press).

Hoffmann, Dirk W. (2008): Software-Qualität. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (eXamen.press), zuletzt geprüft am 18.07.2016.

Intel® (o.J.): Intel® Ethernet Connection I219-LM Spezifikationen. Intel®. Online verfügbar unter <http://ark.intel.com/de/products/82185/Intel-Ethernet-Connection-I219-LM>, zuletzt geprüft am 12.08.2016.

ITWissen (2014): Pingzeit :: ping time :: ITWissen.info. Online verfügbar unter <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Pingzeit-ping-time.html>, zuletzt aktualisiert am 24.01.2014, zuletzt geprüft am 16.07.2016.

ITWissen.info (2016). Online verfügbar unter <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Latenz-latency.html>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2016, zuletzt geprüft am 14.07.2016.

Kerscher, Michael (2016): Schulungskurs Akustische Kamera. Berlin, 13.04.2016. mündlicher Vortrag an Micha Mäcke.

Klimmt, Christoph; Hartmann, Tilo; Vorderer, Peter (2005): Macht der Neuen Medien? In: *Publizistik* 50 (4), S. 422–437. DOI: 10.1007/s11616-005-0142-4.

Lenovo® (2016): ThinkPad P50.indd. Online verfügbar unter [http://psref.lenovo.com/syspool%5CSys/PDF/ThinkPad/ThinkPad%20P50/ThinkPad\\_P50\\_Platform\\_Specifications.pdf](http://psref.lenovo.com/syspool%5CSys/PDF/ThinkPad/ThinkPad%20P50/ThinkPad_P50_Platform_Specifications.pdf), zuletzt geprüft am 20.07.2016.

Maske, Philipp (2012): Mobile Applikationen 1. Interdisziplinäre Entwicklung am Beispiel des Mobile Learning. Univ., Diss.--Hannover, 2011. Wiesbaden: Gabler Verlag.

McAlpine, David (2005): Creating a sense of auditory space. In: *The Journal of physiology* 566 (Pt 1), S. 21–28. DOI: 10.1113/jphysiol.2005.083113.

Mildenberger, Marianne (1961): Film und Projektion auf der Bühne. Emsdetten: Lechte (57).

Raab, Gerhard; Unger, Alexander; Unger, Fritz (2016): Wahrnehmungspsychologie. In: *Marktpsychologie: Grundlagen und Anwendung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 187–201. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02067-5\\_12](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-02067-5_12).

Raffaseder, Hannes (2010): Audiodesign. Kommunikationskette, Schall, Klangsynthese, Effektbearbeitung, Akustische Gestaltung. 2. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag.

- Resolume (2014): Spout - Sharing Video between Applications on Windows. Unter Mitarbeit von Joris. Online verfügbar unter <http://resolume.com/blog/11110/spout-sharing-video-between-applications-on-windows>, zuletzt geprüft am 09.08.2016.
- Rhee, Jen; Marshall, Tim (2008): Wahrnehmung. In: Michael Erlhoff und Tim Marshall (Hg.): Wörterbuch Design. Begriffliche Perspektiven des Design. Basel: Birkhäuser Basel, S. 445–446. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8142-4\\_333](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7643-8142-4_333).
- Römer, Claus (1994): Schall und Raum. Eine kleine Einführung in die Welt der Akustik. Berlin: Vde-Verl.
- Roth, Simone (Hg.) (2005): Akustische Reize als Instrument der Markenkommunikation. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Marken- und Produktmanagement).
- Scheel, Susanne (2009): VJing - Musikvisualisierung im 20. Jahrhundert. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller.
- Schmidt, Ulrich (2005 // 2013): Professionelle Videotechnik. Analoge und digitale Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, HDTV, Kameras, Displays, Videorecorder, Produktion und Studiotechnik // Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage // 6. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg.
- Schnell, Ralf (2000): Medienästhetik. Zu Geschichte und Theorie audiovisueller Wahrnehmungsformen. Stuttgart u.a.: Metzler.
- Schönhammer, Rainer (2013): Einführung in die Wahrnehmungspsychologie. Sinne, Körper, Bewegung. 2., überarb., aktualisierte und erw. Aufl. Wien, Stuttgart: facultas.wuv; UTB (utb-studi-e-book, 3142).
- Sourceforge (o.J.): About | Freeframe.org. Online verfügbar unter <http://freeframe.sourceforge.net/>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2015, zuletzt geprüft am 09.08.2016.
- Spektrum der Wissenschaft (1998): Projektor. Lexikon der Physik. Unter Mitarbeit von o.V. Hg. v. Spektrum Akademischer Verlag. Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/projektor/11666>, zuletzt geprüft am 25.08.2016.
- Spout (o.J.): Realtime video sharing framework for Windows. Unter Mitarbeit von Robert Jarvis. Online verfügbar unter <http://spout.zeal.co/>, zuletzt geprüft am 02.08.2016.
- TECHLIFE SG Pte.Ltd. (2016): TCPSpout. TECHLIFE SG Pte.Ltd. Online verfügbar unter <http://techlife.sg/TCPSpout/>, zuletzt aktualisiert am 08.06.2016, zuletzt geprüft am 20.07.2016.

van Krevelen, D. W. F.; Poelman, R. (2010): A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: *The International Journal of Virtual Reality* 9 (2), S. 1–20.

Vaucelle, Cati; Ishii, Hiroshi (2007): Interfacing Video Capture, Editing and Publication in a Tangible Environment. In: Cécilia Baranauskas, Philippe Palanque, Julio Abascal und Simone Diniz Junqueira Barbosa (Hg.): *Human-Computer Interaction - INTERACT 2007: 11th IFIP TC 13 International Conference, Rio de Janeiro, Brazil, September 10-14, 2007, Proceedings, Part II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–14. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74800-7\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-74800-7_1).

Weinzierl, Stefan (Hg.) (2008): *Handbuch der Audiotechnik*. 1. Aufl. s.l.: Springer-Verlag (VDI-Buch).

Wentura, Dirk; Frings, Christian (2013): *Wahrnehmung*. In: *Kognitive Psychologie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 57–82. Online verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-93125-8\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-93125-8_3).

## 9. Anhänge

### 9.1. Anhang A1



### 9.2. Anhang A2

E-Mail von Herrn Krischker bezüglich dem Datenrekorder. Die E-Mail wurde gekürzt, da nur dieser Abschnitt relevant für diese Arbeit war.

**Gesendet:** Freitag, 22. Juli 2016 um 18:28 Uhr **Von:** "Detlef Krischker" <krischker@gfai.de> **An:** "Micha Mäckle" <Micha.Maeckle[REDACTED]> **Betreff:** Anfrage: "Infos zu Datenrekorder"

Sehr geehrter Hr. Mäckle,

mir ist Ihre Anfrage weitergeleitet worden.

[...]

Sicherlich könnten wir das Bonjour-Protokoll unterstützen, wenn wir eine Apple-Variante unserer Analyse-Software bereitstellen würden. Dazu braucht weiterhin der Datenrekorder ein Firmware-Update, welches das Bonjour-Protokoll bereitstellt. Beides ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht geplant.

Der derzeitige Auslieferungsstand des Messsystems Akustische Kamera mit der festen IP-Adresse 10.0.0.4 beruht auf dem Standard-Anwendungsszenarium, welches bestimmt zu 90% eingesetzt wird. Davon abweichend besteht die Möglichkeit bei einer Integration in ein Firmen-LAN die Netzwerkkonfiguration anzupassen. Aber das ist eine gewollt-statische Konfiguration – auch aus sicherheitskritischen Gesichtspunkten.

Ich hoffe, Ich konnte Ihnen zumindest ein wenig weiter helfen.

Mit freundlichen Grüßen,

Best regards

Detlef Krischker

Signalverarbeitung - Hardwareentwicklung

Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI)

Society for the Advancement of Applied Computer Science

Amtsgericht Berlin-Charlottenburg VR 11031 B

Vorstandsvorsitzender: Prof. Dr. Alfred Iwainky

Geschäftsführer: Dr. Frank Weckend

USt-IdNr.: DE 153647354

GFaI, Dipl.-Ing., MSc D. Krischker phone: +49(0)30 814 563 -561

Volmerstrasse 3 fax: -466

D-12489 Berlin-Adlershof [krischker@gfai.de](mailto:krischker@gfai.de)

<http://www.acoustic-camera.com> <http://www.gfai.de>

## 9.3. Anhang A3

CD-ROM mit Filmaufnahmen des Visualisierungs-Konzepts mit einem musizierenden Duett.

## 9.4. Anhang A4

Quellcode der modifizierten Anwendung SpoutGrid.

```

1
2 import com.onformative.screencapturer.*;
3 import peasy.*;
4
5 Spout spout;
6 PeasyCam cam;
7 ScreenCapturer capturer;
8
9 PImage tex;
10 // VARIABLEN FÜR INDIVIDUELLE GRÖSSE DES CAPTURE-FENSTERS
11 int captureSizeX = 1155;
12 int captureSizeY = 650;
13
14 void setup() {
15 //size(750, 450, P3D);
16 size(1155, 650, P3D);
17 tex = createImage(width, height, RGB);
18 // NEUES SPOUT-OBJEKT
19 spout = new Spout();
20 //NEUER CAPTURER
21 capturer = new ScreenCapturer(width, height, 60);
22 //capturer = new ScreenCapturer(captureSizeX, captureSizeY, 60); // für individuelles Capturer-Fenster
23
24 //NEUE KAMERA FÜR AUSGABE
25 cam = new PeasyCam(this, 0, 0, 0, 800);
26
27 // INITIALIZE A SPOUT SENDER HERE
28 spout.initSender("Spout Processing Grid", width, height);
29 }
30
31 void draw() {
32 // draw grid
33 background(0);
34 translate(-captureSizeX/2, -captureSizeY/2);
35 lights();
36 int steps = 7; // Rasterungs-Teiler der Anzeige
37 int rectangleSize = steps; // Pixelgröße
38
39 // VARIABLEN FÜR FARBERWERTE DER RGB-KANÄLE
40
41 tex = capturer.getImage();
42 for (int i = 0; i<captureSizeX/steps; i++) {
43   for (int j = 0; j<captureSizeY/steps; j++) {
44     pushMatrix();
45     color c = tex.get(i*steps, j*steps);
46     fill(c);
47
48     // RAHMEN
49     //noStroke();
50     //stroke(c);
51
52     // TIEFENINFORMATION DER PIXEL
53     float zS = saturation(c); // Farbsättigung anstatt Helligkeit
54     float zB = brightness(c);
55     float redValue = red(c);
56     float blueValue = blue(c);
57     float greenValue = green(c);
58     float yelValue = red(c)+green(c);
59     float hueValue = hue(c);
60
61     // TRANSFORMATION AUF Z-ACHSE
62     translate(i*steps, j*steps, (zB+yelValue*0.5)*0.5); //Tranformaton anhand des Gelbananteils
63     //translate(i*steps, j*steps, zS+((hueValue + 80)%360)*0.5 ); //Tranformaton anhand des Hue-Wertes
64
65     // UNTERSCHIEDLICHE GEOMETRIEN ZUR AUSWAHL
66     //box(steps-2);
67     //point(0,0,0);
68     //sphere(3);
69     quad(steps, steps, steps-rectangleSize, steps, steps-rectangleSize, steps-rectangleSize, steps, steps-rectangleSize);
70     popMatrix();
71   }
72 }
73 // SEND A SHARED TEXTURE HERE
74 spout.sendTexture();
75 }
76
77
78 // over-ride exit to release sharing
79 void exit() {
80 // CLOSE THE SPOUT SENDER HERE
81 spout.closeSender();
82 super.exit();
83 }

```