



FAKULTÄT FÜR  
INFORMATIK

**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**

**Fakultät für Informatik**

**Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme**

**Bachelorarbeit**

von

Matthias Quaas  
Matrikel-Nr.: 205111

**Konzeptionierung und prototypische Realisierung eines virtuellen  
Modells zur Parametervisualisierung von Schallemissionen**

Zuständiger Hochschullehrer: Prof. Dr. rer. pol. habil. Hans-Knud Arndt

Betreuerin im Unternehmen: Dipl.-Ing. Nicole Mencke (Fraunhofer IFF)

Abgabedatum 30.11.2020

## **Kurzreferat**

Georeferenzierte 3D-Visualisierungen in Verbindung mit virtuellen Umgebungen bieten großes Potential als Werkzeug zur Datenanalyse, aber auch als Präsentations- und Kommunikations-tool. Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptionierung einer Anwendung zur Parametervisualisierung von Schallemissionen in Verbindung mit einer virtuellen Umgebung. Dazu wird ein Konzept erstellt, welches auf der Basis von digitalen Geländemodellen und Datenbeständen von Lärmquellen Nutzern die Möglichkeit gibt, diese Daten zu visualisieren, zu analysieren und ebenfalls zu präsentieren und zu kommunizieren. Es werden Mittel und Wege aufgezeigt, Schallemissionen so aufzubereiten und verständlich darzustellen, dass auch Nichtfachleute diese interpretieren und damit die Auswirkungen von ebendiesen Schallemissionen nachvollziehen können. Das entstandene Konzept ist dabei nutzerfreundlich gestaltet und bietet Raum für zukünftige Erweiterungen.

## **Abstract**

Georeferenced 3D visualization combined with virtual environments offer great potential as a tool for data analysis, but also as a presentation and communication tool. The aim of this work is the conception of an application for the parameter visualization of sound emissions in combination with a virtual environment. For this purpose, a concept is created which, on the basis of digital terrain models and databases of noise sources, gives users the opportunity to visualize, analyze, and also present and communicate this data. It shows ways and means of preparing sound emissions and presenting them in a comprehensible way so that even non-specialists can interpret them and thus understand the effects and consequences of sound emissions. The resulting concept is user-friendly and offers space for future enhancements.

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder noch anderweitig veröffentlicht.

.....  
Ort, Datum

.....  
Vorname Nachname

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und / oder persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen haben.

Allen voran danke ich Prof. Dr. Hans-Knud Arndt von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg für die Möglichkeit der Anfertigung dieser Arbeit und die Betreuung dabei.

Ein besonderer Dank gilt auch Frau Dipl.-Ing. Nicole Mencke, die mich seitens des Fraunhofer-Instituts IFF Magdeburg mit konstruktiver Kritik, Hilfsbereitschaft und Geduld jederzeit unterstützt hat.

Des Weiteren danke ich auch M.Sc. Andreas Pape vom Fraunhofer IFF für die große Unterstützung und die hilfreichen Tipps während der prototypischen Implementierung.

Großer Dank geht auch an Kai Wolf für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich zu jeder Zeit mit allen verfügbaren Mitteln unterstützt haben. Ohne ihren Zuspruch und Rückhalt wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Vielen Dank.

# Gliederung

<b>KURZREFERAT</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG</b> .....	<b>IV</b>
<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>V</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>GLEICHUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>X</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1. MOTIVATION .....	1
1.2. ZIEL DER ARBEIT .....	2
1.3. AUFBAU DER ARBEIT .....	2
<b>2. GRUNDLAGEN</b> .....	<b>4</b>
2.1. INFRASTRUKTUR.....	4
2.1.1. INFRASTRUKTURBEREICHE .....	4
2.1.2. INFRASTRUKTURDATEN .....	5
2.2. GEOREFERENZIERTE VISUALISIERUNG IN 3D.....	6
2.2.1. GEOREFERENZIERUNG.....	6
2.2.2. GEOREFERENZIERTE DATEN .....	6
2.2.3. GEOREFERENZIERTE VISUALISIERUNG .....	8
2.3. TECHNISCHE ASPEKTE DER 3D-VISUALISIERUNG .....	9
2.3.1. VIRTUELLE REALITÄT .....	9
2.3.2. AUSGABEGERÄTE .....	9
2.3.3. EINGABEGERÄTE .....	13
2.4. GRUNDLAGEN SCHALL.....	17
2.4.1. LAUTSTÄRKE / LAUTSTÄRKEPEGEL / LAUTHEIT .....	17
2.4.2. LÄRM / SCHALLEMISSION / SCHALLIMMISSION .....	18
2.5. DATENVISUALISIERUNG .....	20
2.5.1. DATENTYPEN.....	21
2.6. ZUSAMMENFASSUNG .....	21
<b>3. VERWANDTE ARBEITEN</b> .....	<b>22</b>
3.1. ZUSAMMENFASSUNG .....	24
<b>4. KONZEPTIONIERUNG</b> .....	<b>25</b>
4.1. DETAILLIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG .....	25
4.2. ANFORDERUNGEN.....	26
4.2.1. FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN .....	26
4.2.2. NICHT-FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN .....	28

## Gliederung

---

4.2.3. DATEN UND PARAMETER .....	29
4.3. HERLEITUNG DER LÖSUNG .....	30
4.3.1. GRUNDAUFBAU .....	30
4.3.2. VORBEREITUNG VON SZENARIEN.....	32
4.3.3. DARSTELLUNGSEBENEN.....	34
4.3.4. SCHALLDARSTELLUNG .....	35
4.4. INTERFACE .....	38
4.4.1. SYMBOLE UND MENÜS.....	38
4.4.2. MENÜSTRUKTUR.....	42
4.4.3. NAVIGATION IM ELBEDOME .....	46
4.4.4. NAVIGATION AUF DEM TABLET .....	49
4.5. BEISPIELSZENARIEN.....	51
4.6. ZUSAMMENFASSUNG .....	54
<b>5. PROTOTYP.....</b>	<b>55</b>
5.1. IMPLEMENTIERUNG.....	55
5.2. AUFGETRETENE PROBLEME.....	58
5.3. ZUSAMMENFASSUNG .....	59
<b>6. FAZIT UND AUSBLICK.....</b>	<b>60</b>
6.1. FAZIT .....	60
6.2. AUSBLICK .....	61
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>XI</b>
<b>INTERNETQUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XV</b>
<b>BILDQUELLEN.....</b>	<b>XVI</b>

# Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: VR-HEADSET OCVLUS RIFT [IMG_01].....	10
ABB. 2: PROJEKTIONSRAUM – 3D-CUBE DER TU CHEMNITZ [IMG_02].....	11
ABB. 3: PASSIVE PROJEKTION – FUNKTIONSWEISE [IMG_03].....	12
ABB. 4: AKTIVE PROJEKTION – FUNKTIONSWEISE [IMG_04].....	13
ABB. 5: LINKS: KLASSISCHES FTVR-SYSTEM [IMG_05], RECHTS: SPHÄRISCHES DISPLAY DES CO GLOBE [IMG_06] .....	13
ABB. 6: 3D-MOUSE – 3DCONNEXION SPACE MOUSE [IMG_07].....	14
ABB. 7: MECHANISCHES EINGABEBERÄT: STIFT VON SENSABLE [IMG_08].....	15
ABB. 8: BEWEGUNGSPLATTFORM OMNI BY VIRTUIX [IMG_09] .....	16
ABB. 9: STRUKTUR EINES VR-SYSTEMS (ANGELEHNT AN [BRIL09], [DBGJ19]).....	31
ABB. 10: SCHICHTENMODELL DER SYSTEMARCHITEKTUR (ANGELEHNT AN [STRO08]).....	32
ABB. 11: INTERFACE UND PROJEKTORDNERSTRUKTUR UNITY3D.....	34
ABB. 12: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG – REFLEXION EINER SCHALLQUELLE .....	37
ABB. 13: VERWENDETE ICONS .....	39
ABB. 14: DARSTELLUNG DES BEDIENMENÜS AUF DEM TABLET – .....	41
ABB. 15: DARSTELLUNG DES BEDIENMENÜS IM ELBEDOME –.....	42
ABB. 16: MENÜSTRUKTUR AUF NUTZERLEVEL.....	43
ABB. 17: MENÜSTRUKTUR AUF ADMINISTRATORLEVEL.....	45
ABB. 18: MENÜSTRUKTUR AUF DEM TABLET .....	45
ABB. 19: GESTENSTEUERUNG ZU ÖFFNEN/SCHLIEßEN DES MENÜS .....	47
ABB. 20: GESTENSTEUERUNG BEWEGUNG .....	48
ABB. 21: DARSTELLUNG EINES INFORMATIONSPUNKTES INNERHALB .....	49
ABB. 22: DARSTELLUNG EINES NAVIGATIONS- UND ANSICHTSPUNKTES .....	50
ABB. 23: DARSTELLUNG DER ALTERNATIVEN NAVIGATIONSOPTION – .....	51
ABB. 24: CODE – SCENARIOMANAGER .....	56
ABB. 25: CODE – SCENARIOCONFIG .....	57
ABB. 26: CODE – VEHICLECONTROLLER .....	57
ABB. 27: CODE – PHYSICALCALCULATION .....	58

## Gleichungsverzeichnis

GL. (1) .....	18
GL. (2) .....	19
GL. (3) .....	19
GL. (4) .....	20
GL. (5) .....	20

## Abkürzungsverzeichnis

VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
HMD	Head-Mounted Display
HMI	Human Machine Interface
DGM	Digitales Geländemodell
LOD	Level of Detail (Detaillierungsgrad)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, und nukleare Sicherheit
BMVI	Verkehr und digitale Infrastruktur
AR	Augmented Reality
GUI	Graphical User Interface

# 1. Einleitung

Bei städtebaulichen Maßnahmen spielt Lärm eine nicht zu unterschätzende Rolle. Bauprojekte und der daraus resultierende Lärm haben einen großen Einfluss auf die Lebensqualität der Anwohner. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) schreibt dazu in seinem Internetauftritt:

*Bei der städtebaulichen Planung ist die Berücksichtigung des Schallschutzes Pflicht. Das ergibt sich aus Paragraph 50 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und dem Baugesetzbuch (BauGB). Zur Lärminderung trägt darüber hinaus auch die Verkehrsvermeidung bei. Die Verlagerung von Verkehr ist ebenfalls eine Lärminderungsmaßnahme [...] [www\_01].*

Wenn in entsprechenden Lärmgutachten Werte ermittelt werden, liegen diese meist in tabellarischer Form über die zu erwartende Geräuschbelastung vor. Derartige Tabellen sind für Nichtfachleute schwer zu erfassen und zu interpretieren. Selbst der Einsatz von grafischen Hilfsmitteln, wie Lärmkarten, vermittelt einem Anwohner nur schwer den Eindruck der zu erwartenden Lärmbelastung. Durch den Einsatz eines VR-Systems wird es ermöglicht, die Auswirkungen der Schallemissionen zu „erleben“.

## 1.1. Motivation

Bei der Planung von Großprojekten wird oft über die Köpfe der Bevölkerung hinweg entschieden, was in vielen Fällen den Unmut dieser nach sich zieht. Auswirkungen auf Umwelt und Gemeinschaft werden ebenfalls oft nicht betrachtet beziehungsweise gar nicht wahrgenommen. Um derartige Probleme schon in der Planungsphase von infrastrukturellen Großprojekten zu betrachten bieten virtuelle Planungswerkzeuge Möglichkeiten, Aspekte zu betrachten, die allein aus den gesammelten Daten nicht ersichtlich werden. Durch Visualisierung in virtuellen Umgebungen können hier Zusammenhänge erfasst werden, die in der Datenflut unentdeckt bleiben würden.

In nahezu allen Schritten der Entwicklung werden mittlerweile VR-Umgebungen eingesetzt. Diese erleichtern die Arbeit und sparen Entwicklungszeit. Im Rahmen der Entwicklung von Infrastrukturprojekten können sowohl Entscheidungsträger als auch Investoren und Unternehmen von solchen Werkzeugen profitieren.

## **1.2. Ziel der Arbeit**

Georeferenzierte 3D-Visualisierungen, gekoppelt mit Technologien der Virtuellen Realität, nehmen in innovativen Kommunikations-, Präsentations- und Datenanalysewerkzeugen einen immer größeren Stellenwert ein. Durch die Kombination einer anschaulichen Visualisierung mit Planungs- und Kommunikationsansätzen können entsprechende Werkzeuge in infrastrukturellen Projekten maßgeblich an Wert gewinnen. Im Kontext dieser Projekte ist die Betrachtung von Schallemissionen ein wesentlicher Bestandteil der Planung, da sie einen großen Einfluss auf Umwelt und Mensch besitzt.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist ein Werkzeug zu konzeptionieren und prototypisch zu implementieren, welches die Visualisierung von und die Interaktion mit einem virtuellen Modell eines infrastrukturellen Systems am Beispiel eines zu wählenden 3D-Modells aus Sachsen-Anhalt erlaubt und dabei Parameter betrachtet, die im Kontext von Schallemissionen als relevant erarbeitet werden. Es ist zu untersuchen welche Parameter auf welchen Ebenen (Objekt-, Standort- und Regionalebene) welchen Einfluss haben.

Für ihre Darstellung sind geeignete Visualisierungs- und Interaktionstechniken zu identifizieren und prototypisch zu implementieren. Die dafür notwendigen Arbeiten sollen eine Systemarchitektur berücksichtigen, die einen Einsatz sowohl in einem hochmodernen Großprojektionssystem („Elbedome 2.0“ des Fraunhofer IFF) als auch als PC-gestützte Variante ermöglicht.

## **1.3. Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit orientiert sich am realen Ablauf, der sich während der Entwicklung eines solchen Konzepts ergibt. Im Folgenden werden die Kapitel kurz erläutert.

### ***Kapitel 2***

In den Grundlagen werden die wissenschaftlichen und technischen Themenfelder bearbeitet, die notwendig sind, um ein Verständnis für die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit zu entwickeln. Es werden Recherchen bezüglich der Virtuellen Realität und der einzusetzenden Technik vorgestellt. Des Weiteren wird der aktuelle Stand der Technik erläutert, um so einen Einblick in die aktuelle Situation zu erhalten.

### ***Kapitel 3***

In Kapitel 3 werden verwandte Arbeiten betrachtet, welche im Umfeld des bearbeiteten Themas erstellt worden sind. Es werden Informationen zu Erkenntnissen aus der virtuellen Realität, der

Darstellung von Schall, zur Nutzung von VR als Kommunikationsplattform und weiteren analysiert und verarbeitet.

#### ***Kapitel 4***

Im Verlauf dieses Kapitels wird die Aufgabenstellung präzisiert, die Anforderungen festgelegt und eine Lösung daraus hergeleitet. Es werden Konzepte für Steuerung und Navigation erstellt und die Struktur und das Design des Interface bestimmt. Abschließend werden Beispiele für Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

#### ***Kapitel 5***

Die prototypische Realisierung umfasst die ersten Schritte der Entwicklung und Implementierung eines Prototyps zur Evaluierung des Konzepts. Die im Laufe der Entwicklung auftretenden Änderungen und Verbesserungen sowie aufgetretene Probleme werden im Zuge dieses Kapitels beschrieben.

#### ***Kapitel 6***

In Kapitel 6 wird ein Fazit aus der vorliegenden Arbeit gezogen, eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben und ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungs- und Entwicklungsfelder gegeben.

## 2. Grundlagen

Um genauer in die Thematik dieser Arbeit einzusteigen, ist es notwendig, einige grundlegende Begriffe und Techniken näher zu betrachten. Es wird der Begriff Infrastruktur beleuchtet und auf relevante Bereiche eingegangen. Erläutert wird ebenfalls, was Virtuelle Realität bedeutet und welche Techniken existieren, um diese zu erschaffen und zu erleben. Auch das Gebiet der visuellen Wahrnehmung wird dabei betrachtet und auf die relevanten Arten von Informationsvisualisierung eingegangen.

### 2.1. Infrastruktur

Der Begriff Infrastruktur, zu deutsch etwa Unterbau oder Grundgerüst, ist sehr weitläufig definiert. Im Allgemeinen wird dabei meist von der wirtschaftlichen Infrastruktur gesprochen, welche der Duden als *notwendigen wirtschaftlichen und organisatorischen Unterbau als Voraussetzung für die Versorgung und die Nutzung eines bestimmten Gebiets, für die gesamte Wirtschaft eines Landes* definiert [Dude20]. Der Brockhaus sieht darin die *materielle, institutionelle und personelle Grundlage einer arbeitsteiligen Wirtschaft* [Broc20].

Nach JOCHIMSEN wird Infrastruktur dabei unterteilt in materielle, institutionelle und personelle Infrastruktur. Die materielle Infrastruktur bezieht sich auf die immobilen Kapitalgüter, wie z. B. Gebäude, Straßen, Einrichtungen und Anlagen, die zur Produktion von Infrastrukturgütern und -diensten beitragen. Die institutionelle Infrastruktur beinhaltet die Regeln und Normen, welche die gesellschaftlichen Interaktionen festlegen und die dazugehörigen Einrichtungen, die zu deren Umsetzung und Durchführung beitragen. Die Bevölkerung und ihre Eigenschaften und Fähigkeiten, welche aus den körperlichen Voraussetzungen und ihrer Bildung hervorgehen, werden der personellen Infrastruktur zugeschrieben [Buhr09].

#### 2.1.1. Infrastrukturbereiche

In der Literatur sind die unterschiedlichsten Bereiche für Infrastruktur zu finden. Allein in ‚*Intelligent Infrastructure*‘ von NEGENBORN ET AL gibt es schon vier Unterteilungen: generische, elektrische, Verkehrs- und Wasserinfrastruktur [NeHL10]. Diese beziehen sich auf die von Jochimsen beschriebene materielle Infrastruktur. Im Duden wird diese ebenfalls weiter unterteilt in die technische und die soziale Infrastruktur [Dude16]. Es gibt weitere Unterteilungen, da allerdings die Unterteilung des Dudens nach Ansicht des Autors die gebräuchlichste darstellt, wird darauf weiter eingegangen. Auch diese Einteilung lässt sich weiter spezifizieren.

### ***Technische Infrastruktur***

Eine exakte Definition der technischen Infrastruktur liegt in der Fachliteratur nicht vor. Allen Erklärungs- beziehungsweise Definitionsversuchen gemein ist, dass darunter weithin Einrichtungen zur Energieversorgung und Kommunikation, zur stofflichen Ver- und Entsorgung, für den öffentlichen und Individualverkehr verstanden werden. Darunter werden, um ein paar Beispiele zu nennen, die Verkehrswege mit den Straßen-, Schienen- und Wasserstraßennetzen, die Energie- und Wasserversorgung mit ihrem Netz aus Strom- und Wasser-/Abwasserleitungen oder Telekommunikationsnetze und weitere derartige Einrichtungen verstanden [Buhr09], [NeHL10].

### ***Soziale Infrastruktur***

Auch zum Begriff der sozialen Infrastruktur lässt sich keine einheitliche Definition finden. Meist ist in der Literatur darunter eine Zusammenstellung von Dienstleistungen beziehungsweise Einrichtungen, die der Deckung bestimmter menschlicher Grundbedürfnisse auf der sozialen Ebene dienen, zu verstehen [BöPr15]. KOBLSCHKE beschreibt sie als *jene Einrichtungen, welche die Entwicklung des Humankapitals und der sozialen Beziehungen innerhalb einer Gesellschaft fördern* [Kobl08]. Nach VAN LAAK umfasst die soziale Infrastruktur Einrichtungen und Anlagen für Bildung und Fürsorge, für Gesundheitssystem und öffentliche Sicherheit, ebenso wie kulturelle Einrichtungen und jene zur sozialen Sicherung [Laak08].

Allgemein fallen darunter beispielsweise Einrichtungen und Strukturen wie Schulen und Kindergärten, Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen, aber auch Theater und Bibliotheken oder Sportanlagen und Parks.

Bezugnehmend auf die Thematik der vorliegenden Arbeit wird im weiteren Verlauf das Augenmerk hauptsächlich auf die technische Infrastruktur und dort im Besonderen auf die Verkehrsinfrastruktur gelegt.

## **2.1.2. Infrastrukturdaten**

Da es keine einheitliche Definition von Infrastruktur gibt, liegt folglich auch keine solche für Infrastrukturdaten vor. Anhand von Beispielen lässt sich aber ein allgemeines Verständnis für den Begriff erzeugen. Werden die einzelnen Teilaspekte (der technischen Infrastruktur) betrachtet, wie beispielsweise die bereits erwähnte Verkehrsinfrastruktur, liegen Infrastrukturdaten in multiplen Formen und Formaten vor. Daten über Straßennetze oder Verkehrsdichte

stehen zur Verfügung. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) stellt Daten und Informationen über Verkehrsaufkommen, Straßenverkehrsunfälle, Transportbilanzen oder Länge der Verkehrswege und noch etliche weitere Informationen in ‚*Verkehr in Zahlen 2019/2020*‘ zur Verfügung [BMVI19]. Detaillierte Informationen zu entsprechenden Georeferenzdaten liefert das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit dem ‚GeoPortal.Deutschland‘ [www\_02]. Weitere Verkehrsinfrastrukturdaten liefert auch das Statistische Bundesamt oder andere Statistik-Portale wie beispielsweise Statista. Dort können Daten wie die Anzahl der Elektroautos in Deutschland, der Absatz von e-Bikes in Deutschland oder die Investitionen des Bundes in Verkehrswege abgerufen werden [www\_03], [www\_04].

## **2.2. Georeferenzierte Visualisierung in 3D**

Zum Verständnis der vorliegenden Arbeit ist es wichtig, zu verstehen, was georeferenzierte Daten sind und wie diese verwendet werden. Ebenso soll ein Einblick vermittelt werden, wie diese Daten zu visualisieren sind, um einen optimalen Informationsgewinn daraus zu erhalten. Im Folgenden wird dies näher erläutert.

### **2.2.1. Georeferenzierung**

Georeferenzierung bedeutet, Informationen in Bezug zu ihren geografischen Positionen zu setzen. Die Nutzung von Landkarten oder Globen in diesem Zusammenhang ist seit langer Zeit ein vertrauter Prozess. Im Laufe der Zeit haben sich aus solch einfachen Anwendungen Geoinformationssysteme (GIS) entwickelt, die es erlauben georeferenzierte Daten zu speichern und zu analysieren [Hill06]. Geoinformationssysteme stellen dabei ein aus Hardware, Software und Daten bestehendes, rechnergestütztes System dar, welches dazu dient, verschiedene Aufgabenstellungen in Bezug auf den räumlichen Aspekt zu betrachten und zu bearbeiten [Ratf11].

### **2.2.2. Georeferenzierte Daten**

Geofachdaten stellen Daten aus wissenschaftlichen Fachbereichen dar, welche durch das Präfix ‚Geo‘ deutlich machen, dass ein expliziter Raumbezug gegeben ist [Ratf12].

Im Unterschied zu Geofachdaten stellen georeferenzierte Daten den Raumbezug zu Sachverhalten und Objekten verschiedener wissenschaftlichen Daten durch Koordinaten her. Dadurch werden Möglichkeiten zur Analyse der Fachdaten in Geoinformationssystemen geschaffen. Solche georeferenzierten Daten enthalten unter anderem Parameter und Koordinaten eines geodätischen Koordinatenreferenzsystems, Digitale Geländemodelle (DGM) und auch Daten

des Liegenschaftskatasters. Die wirtschaftliche Bedeutung georeferenzierter Daten wird deutlich, wenn betrachtet wird, dass dadurch in Kombination mit statistischen Daten beispielsweise Pendlerströme oder das Einkaufsverhalten analysiert werden können. Ebenso ist eine ortsbezogene Risikobewertung durch Versicherer möglich. Raumplanung oder Verkehrsdichte sind weitere mögliche Themen, welche mittels georeferenzierter Daten analysiert und interpretiert werden können, um nur ein paar Beispiele zu nennen [Ratf12], [Lang13].

Eine große Datenbank mit Geodatenbeständen liefert das GeoPortal.Deutschland. Es handelt sich um eine Plattform, entwickelt und betrieben von Bund, Ländern und Kommunen, mit Datenbeständen beispielsweise folgender öffentlicher Einrichtungen:

- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)
  - u. a. geodätische, kartographische, georeferenzierte Daten
- Bundesamt für Migration und Flüchtlinge (BAMF)
  - z. B. Infrastrukturdaten über Verteilung, Zusammensetzung der Bevölkerung
- Bundesamt für Naturschutz (BfN)
  - u. a. Daten zur Entwicklung von Ökosystemen, Einflüssen auf Lebensräumen
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
  - bspw. Daten zur Infrastruktur von Schifffahrtswegen
- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
  - u. a. Infrastrukturdaten zur Verkehrsinfrastruktur
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)
  - z. B. Geodaten zu Stadtentwicklung, Infrastrukturdaten zu Flächenverteilung
- Deutsche Bahn Netz AG (DB Netz AG)
  - u. a. Infrastrukturdaten zum Schienennetz, Auslastung
- Eisenbahn Bundesamt (EBA)
  - bspw. Infrastrukturdaten zum Schienennetz, Auslastung
- Statistisches Bundesamt (Destatis), auch im Auftrag der Statistischen Ämter der Länder
  - z. B. Statistische Daten zur Bevölkerungsentwicklung, Verkehrsaufkommen
- Umweltbundesamt (UBA)
  - u. a. Daten über Luftverschmutzung, Lärmbelastung
- Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)
  - bspw. Daten zur Infrastruktur von Schifffahrtswegen

Mit diesem Portal ist ein zentraler Zugang zu allgemeinen Geobasisdaten und spezifischen Geofachdaten gegeben [Ratf12].

### 2.2.3. Georeferenzierte Visualisierung

Die zuvor erwähnten Daten liegen oft in großen Mengen und in einer sehr hohen Komplexität vor. Dies erschwert das Verständnis beziehungsweise die Interpretation solcher Daten selbst für Experten. Aus diesem Grund werden die Daten auf unterschiedliche Weise visualisiert, um so die Analyse und Deutung der Information zu erleichtern.

#### *Visualisierung*

Um ein Verständnis für georeferenzierte Visualisierung zu erzeugen, wird im Folgenden kurz Visualisierung im Allgemeinen betrachtet. Nach DIEHL beschreibt Visualisierung den Prozess, bei welchem Informationen in eine visuelle Form transformiert werden, die es dem Nutzer gestattet, versteckte Besonderheiten und Merkmale aus den Daten zu extrahieren und zu analysieren [Dieh07]. Visualisierung bietet dementsprechend die Möglichkeit, beispielsweise Muster, Cluster oder Korrelationen in den Daten zu erkennen und auf deren Basis Hypothesen aufzustellen, Entscheidungen zu treffen oder Informationen verständlicher darzustellen.

Weitere Informationen lassen sich beispielsweise bei CARD ET AL., MAZZA oder MUNZNER finden [CaMS99], [Mazz09], [Munz14].

#### *Georeferenzierte Visualisierung*

Georeferenzierte Visualisierung (GeoVis) bedient sich der Konzepte der allgemeinen Visualisierung und bezieht dabei zusätzlich zu den raumbezogenen Daten und Informationen beispielsweise temporale Aspekte mit ein. MÜLLER beschreibt sie als *grafische Abbildung georäumlicher Daten mit interaktiven elektronischen Medien und [dem] Ziel, die Gewinnung von georäumlichen Erkenntnissen zu unterstützen* [Müll05]. MACEACHREN bezieht in seinen Ausführungen zur Geovisualisierung auch Aspekte aus der Kartografie, der explorativen Datenanalyse oder der Bilderkennung mit ein [Mace95]. Aus den unterschiedlichen Definitionen in der Literatur kann zusammengefasst werden, dass bei georeferenzierter Visualisierung raumbezogene Daten (oft mit temporalem Aspekt) auf geeigneten Medien (Karten, Globen, digitalen Geländemodellen (DGM), etc.) dargestellt beziehungsweise visualisiert werden, um den Nutzer bei der Analyse, Interpretation und Präsentation von Informationen zu unterstützen.

## 2.3. Technische Aspekte der 3D-Visualisierung

### 2.3.1. Virtuelle Realität

Der Begriff „Virtuelle Realität“ an sich ist eigentlich ein Oxymoron, da sich die Begriffe virtuell und real konträr gegenüberstehen. Häufig wird deshalb auch der Begriff „Virtuelle Umgebung“ oder „Virtual Environment“ genutzt. Da der Begriff „Virtuelle Realität“ (VR) jedoch Einzug in den allgemeinen Sprachgebrauch gehalten hat, wird er auch im Folgenden weiterverwendet. Im Brockhaus wird Virtuelle Realität als *eine mittels Computer simulierte Wirklichkeit oder künstliche Welt, in die Personen mit Hilfe technischer Geräte sowie umfangreicher Software versetzt und interaktiv eingebunden werden* [Broc97] beschrieben.

BRILL führt in seinem Buch ‚*Virtuelle Realität*‘ auf, dass es keine einheitliche Definition für den Begriff gibt. Weiterhin beschreibt er sie als [...] *eine neuartige Benutzungsoberfläche, in der die Benutzer innerhalb einer simulierten Realität handeln und die Anwendung steuern und sich im Idealfall so wie in ihrer bekannten realen Umgebung verhalten* [Bril09].

Mit Hilfe der virtuellen Realität können komplexe Inhalte leicht verständlich dargestellt werden. Dies betrifft die verschiedensten Einsatzbereiche, u. a. die Medizin, in der Operationen trainiert werden können, ohne Patienten dabei in Gefahr zu bringen. In der Automobilindustrie können die Produkte schon in der Planungsphase visualisiert werden, um die Kosten für die Entwicklung zu senken. Piloten können in Simulatoren Extremsituationen trainieren, ohne ihr eigenes Leben oder ein reelles Flugzeug zu gefährden. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und die aufgeführten Beispiele stellen nur einen Auszug dieser dar [KuAT17], [RuWi20], [KOHT19].

Um solche Anwendungen zu realisieren, sind VR-Systeme notwendig. Virtuelle Umgebungen bieten eine höhere Immersion, wenn entsprechende Ein- und Ausgabegeräte verwendet werden [DBGJ19].

### 2.3.2. Ausgabegeräte

Die Ausgabegeräte können nach zwei Grundprinzipien klassifiziert werden: Inside-Out oder Outside-In. Bei Inside-Out befindet sich der Nutzer innerhalb der virtuellen Umgebung; beim Prinzip Outside-In sieht der Nutzer durch eine Art „Fenster“ in die virtuelle Umgebung hinein [Bril09].

### ***VR-Headset***

Ein häufig eingesetztes Ausgabegerät für Anwendungen in der Virtuellen Realität ist ein VR-Headset (Abb. 1), eine Art des Head-Mounted Displays (HMD). HMDs sind in der Regel kleine Displays, welche – vergleichbar mit einer Brille – unmittelbar vor dem Auge getragen werden. Sie bestehen neben dem Display meist auch aus zusätzlichen Komponenten wie einem Trackingmodul oder Lautsprechern und einer Vorrichtung zur Befestigung am Kopf. Monokulare HMDs werden nicht weiter betrachtet, da sie aufgrund der bauartbedingten Nutzung mit nur einem Auge keine stereoskopische Sicht ermöglichen und daher für die vorliegende Arbeit nicht relevant sind.

Die binokularen HMDs lassen sich dabei weiter in See-Through und Lookaround klassifizieren. Bei den (teil-)durchsichtigen (See-Through) Displays kommen halbdurchlässige Spiegel zum Einsatz, auf welche die Informationen projiziert werden. Dabei kann der Nutzer seine reale Umgebung wahrnehmen und bekommt die virtuellen Informationen eingeblendet. Aus diesem Grund finden sie häufig ihren Einsatz in der Augmented Reality (AR).

Durch die geschlossenen HMDs (Lookaround) sieht der Nutzer nur die virtuelle Umgebung und die darin vorhandenen Informationen. Einige Modelle verfügen über Kameras, welche die reale Umgebung auf den Displays darstellen können [TPAM16], [Bril09].



**Abb. 1:** VR-Headset Oculus Rift [img\_01]

### ***Projektionsräume***

Projektionsräume bilden ein weiteres Ausgabegerät. Die meisten basieren auf dem CAVE (rekursives Akronym für Cave Automatic Virtual Environment), einem 1992 an der University of Illinois at Chicago entwickelten Projektionssystem für virtuelle Umgebungen. Dieses setzt

sich aus bis zu sechs Projektionsflächen zusammen, welche damit einen Raum bilden, in welchem virtuelle Realitäten dargestellt werden können.

Die Auflösung und die Bildwiederholrate der Projektoren dieser Räume müssen sehr hoch sein, um eine gute Darstellung der virtuellen Welt zu gewährleisten. Für gewöhnlich wird dabei die Rückprojektion eingesetzt. Das heißt, die Projektoren strahlen semi-transparente Leinwände von der Rückseite an, um Verdeckungen durch den Nutzer zu verhindern.

Werden die Leinwände horizontal angeordnet, analog zu einer Tischplatte, wird eine Arbeitsfläche geschaffen, die einer virtuellen Werkbank gleicht. Daraus leiten sich die Bezeichnungen „Virtual Workbench“ oder „Holobench“ ab [Bril09], [DBGJ19].

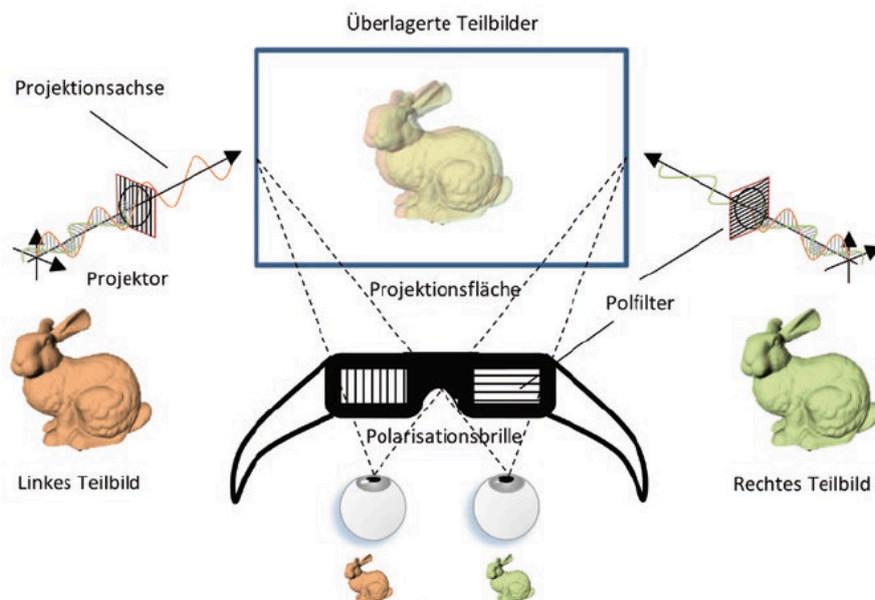


**Abb. 2:** Projektionsraum – 3D-Cube der TU Chemnitz [img\_02]

### ***Aktive / Passive Projektion***

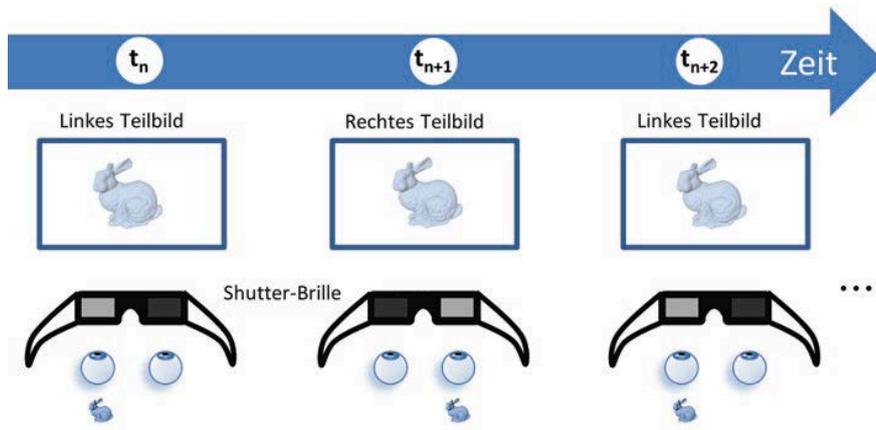
Bei der passiven Projektion werden zwei Projektoren beziehungsweise Projektoren mit zwei Objektiven verwendet. Dabei findet die Besonderheit der Lichtwellen Anwendung, welche in verschiedenen Dimensionen schwingen. Durch den Einsatz von Polarisationsfiltern werden diese Wellen in zwei sich orthogonal gegenüberstehende Wellen aufgeteilt. Diese beiden Teilbilder überlagern sich auf der Projektionsfläche und werden vom Nutzer gleichzeitig wahrgenommen. Der Nutzer trägt eine Brille, dessen Gläser mit Polfiltern ausgestattet sind. Die sind analog zu denen des Projektors ausgerichtet. Das ermöglicht das stereoskopische Sehen der Darstellung. Dieses Verfahren ist allerdings fehleranfällig. Durch die Kopfneigung des Nutzers kann es zum Ghosting kommen, das heißt, es werden Bilder des anderen Kanals gesehen. Um

diesen, als Crosstalk bezeichneten Fehler zu kompensieren, werden zirkulare Polfilter eingesetzt. Diese trennen das Licht in links- und rechtsdrehende Wellen, sodass Crosstalk weitestgehend verhindert wird. Ein weiterer Nachteil von passiven Projektionen ist der hohe Qualitätsanspruch an die Projektionsflächen, welcher nur durch hochwertige, metallbeschichtete Leinwände erfüllt werden kann [Bril09], [DBGJ19].



**Abb. 3:** Passive Projektion – Funktionsweise [img\_03]

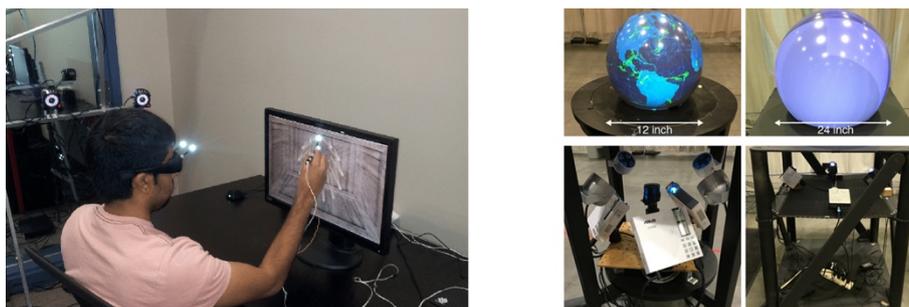
Die Bezeichnung „Aktive Projektion“ leitet sich daraus ab, dass bei diesem Verfahren eine Brille getragen wird, welche abwechselnd das linke und das rechte Auge mittels eines Shutter-LCDs verdeckt: die sogenannten Shutter-Brillen. Die Projektion stellt dabei im gleichen Rhythmus die Bilder für das rechte und das linke Auge dar, sodass bei geschlossenem linken Shutter das Bild für das rechte Auge projiziert wird und umgekehrt. Die Synchronisation zwischen Projektor und Brille erfolgt dabei heute üblicherweise durch Funkübertragung wie beispielsweise Bluetooth. Die Frequenz, in der die Bilder wechseln beziehungsweise die LCDs geschlossen werden, ist dabei so hoch, dass das Gehirn die Einzelbilder zu einem stereoskopischen Bild verschmilzt. Aufgrund dieser Tatsache muss im Gegenzug die Bildwiederholrate doppelt so hoch sein wie bei passiven Systemen [DBGJ19].



**Abb. 4:** Aktive Projektion – Funktionsweise [img\_04]

### *Fish Tank VR*

Während das VR-Headset und die Projektionsräume Inside-Out-Lösungen darstellen, handelt es sich bei Fish Tank VR (FTVR) um eine Outside-In-Lösung. Damit ist ein System bezeichnet, welches einen Monitor als Ausgabegerät verwendet (Abb. 5 links). Durch diese „Fenster“ – ähnlich einem Aquarium (was den Namen begründet) – blickt der Nutzer in die virtuelle Umgebung und interagiert mit dieser. Dabei kommt aktive oder passive Stereoskopie zum Einsatz [Bril09]. Während die traditionellen FTVR-Systeme fast ausschließlich von einem einzelnen Nutzer verwendet werden können, bieten neuere Ansätze Multi-User-Unterstützung durch den Einsatz von sphärischen Displays, wie beispielsweise der „Co Globe“ (Abb. 5 rechts) von Forschern der Universität von British Columbia und der Universität von Saskatchewan [FZCH18].



**Abb. 5:** links: klassisches FTVR-System [img\_05], rechts: Sphärisches Display des Co Globe [img\_06]

### 2.3.3. Eingabegeräte

Um dem Nutzer die Interaktion mit der Virtuellen Welt zu ermöglichen, sind Eingabegeräte erforderlich. Eine Klassifizierung dieser kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, darauf wird

in der vorliegenden Arbeit aber nicht eingegangen. Es werden häufig verwendete Geräte kurz erläutert.

### ***3D-Mouse***

Bei einer 3D-Mouse handelt es sich um ein vergleichsweise simples Eingabegerät. Mit ihr kann gemäß der sechs Freiheitsgrade navigiert werden. Durch frei belegbare Buttons wird die Funktionalität noch erweitert (Abb. 6). Unterschieden werden sie hauptsächlich durch ihre Größe und die Anzahl verfügbaren Buttons. Ein Vorteil dieser Geräte ist in ihrer hohen Genauigkeit begründet. Da sie für gemeinhin auf einem Tisch verwendet werden, finden sie hauptsächlich bei Outside-In-Lösungen für VR-Systeme Anwendung [GBHH19].



**Abb. 6:** 3D-Mouse – 3Dconnexion Space Mouse [img\_07]

### ***Mechanische Eingabegeräte***

Mechanische Eingabegeräte verarbeiten Bewegungen des Nutzers über z. B. Seilzüge oder Gestänge (Abb. 7). Aufgrund der Mechanik bieten sie eine sehr hohe Genauigkeit und eine geringe Latenz. Die Messung wird hierbei durch Winkel und Abstände zwischen den Gelenken realisiert, in dem Zahnräder beziehungsweise Getriebe gemessen und / oder Potenziometer oder Dehnmessstreifen verwendet werden. Nachteilig wirkt sich in diesem Fall die Tatsache aus, dass jederzeit Kontakt zwischen dem Nutzer und dem Eingabegerät vorhanden sein muss. Dies kann sich störend auf die Bewegungsfreiheit und dementsprechend auch auf die Immersion auswirken [GBHH19], [DBGJ19].



**Abb. 7:** Mechanisches Eingabegerät: Stiff von SensAble [img\_08]

### ***Bewegungsplattformen***

Virtuelle Umgebungen können unendliche Weiten darstellen. Der Bewegungsspielraum in einem VR-System ist jedoch durch die örtlichen Gegebenheiten begrenzt, was den Nutzer bereits nach wenigen Schritten an die (buchstäblichen) Ränder des zur Interaktion zur Verfügung stehenden Raumes bringt. Daraus resultieren unterschiedliche Ansätze zur Navigation in der virtuellen Realität. Einer davon ist ein Laufband (engl. Treadmill), welches dem Nutzer gestattet, sich in der virtuellen Umgebung „natürlich“ fortzubewegen. Laufbänder sind standardmäßig nur in einer Richtung nutzbar, sodass sich im Lauf der Entwicklung omnidirektionale Ansätze entwickelt haben. Bei der CyberWalk Treadmill von Souman et al. werden orthogonal zur Hauptrichtung ausgerichtete Laufbänder verwendet [SGSF11]. So wird es dem Nutzer ermöglicht, sich richtungsunabhängig in der VR zu bewegen, während er mittig auf der Lauffläche bleibt. Ein weiteres Konzept ist, den Nutzer über eine Halterung an seiner Position zu fixieren, während er sich auf einem rutschigen Bodenbelag bewegt. Ein solches Konzept stellt beispielsweise der Omni (Abb. 8) von Virtuix dar [GBHH19], [DBGJ19].



**Abb. 8:** Bewegungsplattform Omni by Virtuix [img\_09]

## 2.4. Grundlagen Schall

Schall ist weithin definiert als mechanische Schwingungen in elastischen Medien. Aus physikalischer Sicht werden dabei von einer Schallquelle Schwingungen erzeugt, welche durch die umgebende Luft zum Ohr des Hörers übertragen werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  beträgt dabei 344 m/s [Möse15], [HHHK17].

### 2.4.1. Lautstärke / Lautstärkepegel / Lautheit

#### *Lautstärke*

Die Lautstärke bezeichnet umgangssprachlich die Schallstärke beziehungsweise den Schalldruck. Der Schalldruck, der vom Menschen wahrgenommen werden kann, liegt zwischen 0,00002 Pa (20  $\mu$ Pa) im unteren Bereich (Hörschwelle) und, je nach Literatur, bei 20-200 Pa im oberen Bereich (Schmerzgrenze). Auf Basis des Weber-Fechner-Gesetz<sup>1</sup> wird durch Logarithmieren der Schalldruck zum Schalldruckpegel, welcher als Bezugsgröße die Hörschwelle verwendet. Beim Schalldruckpegel wird die Pseudoeinheit deziBel (dB) verwendet. Gemäß DIN 1320:2009-12 ist der Schalldruckpegel wie folgt definiert:

*Zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des zeitbewerteten Quadrates des frequenzabhängigen Schalldruckes zum Quadrat des Bezugswertes (Bezugswert für Luft ist 20  $\mu$ Pa)*

Der Schalldruckpegel an der Hörschwelle liegt somit bei 0 dB und an der Schmerzgrenze bei 120-140 dB, je nach Literatur.

Das menschliche Gehör ist nicht nur schalldruck-, sondern auch frequenzabhängig. Daraus ergibt sich, dass für unterschiedliche Frequenzen unterschiedliche Schalldrücke ausschlaggebend für das Lautstärkeempfinden sind. So werden tiefe Frequenzen bei gleichem Schalldruck als wesentlich leiser empfunden als mittlere Frequenzen. Aus diesem Grund werden Frequenzbewertungsverfahren genutzt, um die Pegel an das menschliche Hörempfinden anzunähern. Sie werden mit Indizes gemäß ihrer Bewertungskurve versehen. International hat sich hierbei die A-Bewertungskurve durchgesetzt, weshalb häufig die Angaben des Schalldruckpegels in dB(A) gemacht werden. [Möse15], [HHHK17].

---

<sup>1</sup> Kurz: Lineare Zunahme der Empfindungsstärke entspricht logarithmischer Zunahme der Reizstärke [BrLS19]

### ***Lautstärkepegel***

Die Psychoakustik als Teil der Psychophysik beschreibt die Zusammenhänge zwischen den rein physikalischen Schallereignissen und den menschlichen Hörereignissen [Genu10]. Die Frequenzabhängigkeit bei der menschlichen Wahrnehmung von Lautstärke kann durch Kurven gleicher Lautstärke korrigiert werden. Dieser Lautstärkepegel  $L_N$  erhält die Einheit phon und ist einem Zahlenwert zugeordnet, der dem Schalldruckpegel eines gleichlauten 1 kHz Sinustons entspricht. Ein Schallereignis hat beispielsweise einen Lautstärkepegel von 40 phon, wenn ein 1 kHz Sinuston mit 40 dB als gleich laut empfunden wird [Möse18].

### ***Lautheit***

Die subjektiv empfundene Lautstärke wird als Lautheit  $N$  mit der Einheit sone festgelegt. Oberhalb von 40 phon verdoppelt sich das Lautstärkeempfinden bei einer Steigerung des Lautstärkepegels um 10 phon. Ein Lautstärkepegel von 40 phon entspricht 1 sone, 50 phon entsprechen 2 sone, 60 phon 4 sone, usw. Oberhalb von 40 phon ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$N = 2^{0,1(L_N - 40)} \text{ sone} ; L_N \geq 40 \quad \text{Gl. (1)}$$

Unterhalb von 40 phon sind niedrigere Schalldruckpegel notwendig, um die Lautstärkeverdopplung wahrzunehmen [HHHK17], [Möse18].

## **2.4.2. Lärm / Schallemission / Schallimmission**

### ***Lärm***

*Schall wird zu Lärm, wenn er entweder gesundheitsschädlich aufgrund zu hoher Schalldruckpegel oder belästigend ist* (Häupl et al. 2017). Das heißt, wenn Schall die Gesundheit schädigt, das Hörvermögen beeinträchtigt oder sogar zum Hörverlust führen kann, wird er als Lärm bezeichnet (siehe auch Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung). Es gibt aber auch psychologische Faktoren, die Schall zu Lärm werden lassen. Laute Musik beispielsweise wird nicht als Lärm wahrgenommen, wenn sie den Musikgeschmack des Hörers trifft. Auch Faktoren wie Situation, Ort oder Zeit haben Auswirkungen auf die Wahrnehmung [HHHK17].

### ***Schallemission / Schallimmission***

Wird von einer entsprechenden Quelle Schall ausgesendet, wird diese als Schallemission bezeichnet, abgeleitet vom Lateinischen *emittere* ‚heraussenden‘. Im Gegensatz dazu wird das Einwirken von Schall als Schallimmission bezeichnet [DIN\_09].

Für eine wirkungsbezogene Beurteilung sind einfache Angaben des Schalldrucks beziehungsweise Schalldruckpegels unzureichend. Durch die Einbeziehung zusätzlicher Einflussgrößen wird der Beurteilungspegel gebildet. Dieser wird zum Vergleich mit Immisionswerten genutzt, denen ein entsprechendes Schutzziel zugrunde liegt, beispielsweise im Arbeitsschutz oder der Verhinderung von Lärmbelästigung. Die Ermittlung von Geräuschbelastung kann dabei sowohl rechnerisch, als auch mittels entsprechender Messtechnik erfolgen [MüMö17]. Richtlinien des VDI für die Messungen finden sich in der VDI 3723 [VDI\_93], [VDI\_06]. Weitere Informationen zu Beurteilungskenngrößen, rechnerische bzw. messtechnische Ermittlung von Belastungen, Normen und Gesetzen können bei MÜLLER ET AL. nachgelesen werden [MüMö17].

### ***Schallausbreitung***

Für die vorliegende Arbeit wird von Punktschallquellen ausgegangen, bei denen sich der Schall kugelförmig ausbreitet. Die Betrachtung von Linienquellen, wie sehr dicht befahrene Straßen oder Eisenbahnzüge, erfolgt nicht, da der Gesamtschall nur bei hinreichend großen Abständen als Linienquelle wahrgenommen wird [Möse15].

Der Schalldruckpegel hängt neben anderen Faktoren auch von der Entfernung zur Schallquelle ab. Die verringerte Intensität des Schalls ergibt sich daraus, dass die Energie sich mit zunehmendem Abstand auf eine größere Kugeloberfläche verteilen muss. Daher folgt, dass sich der Schalldruckpegel ebenfalls mindert. Somit gilt:

$$L(r) \approx L_W - 20 \lg(r) - 11 \text{ dB} \quad \text{Gl. (2)}$$

Aus diesem Abstandsgesetz folgt, dass sich der Schalldruckpegel um 6 dB verringert, wenn sich die Entfernung verdoppelt. Sind diese Schallquellen auf einer reflektierenden Oberfläche, beispielsweise einer Straße, angeordnet, ergibt sich aufgrund der Reflexion eine Erhöhung des Pegels um 3 dB. Daher gilt:

$$L(r) \approx L_W - 20 \lg(r) - 8 \text{ dB} \quad \text{Gl. (3)}$$

Treten mehrere inkohärente Schallquellen auf, addieren sich ihre Pegel nach dem Gesetz der Pegeladdition. Dieses lautet:

$$L_{ges} \approx 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \text{ dB} \quad \text{Gl. (4)}$$

An Hindernissen tritt eine Beugung des Schalls auf. Deshalb bieten Schallschutzwände auch keine komplett schallisolierende Wirkung. Die Einfügungsdämmung von Schallschutzwänden lässt sich mittels des Umwegesetz annähern.

$$R_E \approx 10 \lg \left( 2\pi^2 \frac{U}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad \text{Gl. (5)}$$

Einflüsse zum Beispiel von Bewuchs oder durch temperaturbedingte Unterschiede des Luftdrucks werden hierbei, wie in den gängigen Normen und Richtlinien, bewusst außer Acht gelassen [HHHK17], [Möse15], [HSFE08].

## 2.5. Datenvisualisierung

Die Visualisierung von Daten stellt einen stetig größer werdenden Aspekt in der heutigen Zeit dar. DIEHL definiert Visualisierung als den *Prozess der Transformation von Informationen in eine visuelle Form, die es dem Benutzer auf visuelle Weise gestattet, verborgene Aspekte in den Daten zu entdecken, die für Exploration und Analyse wesentlich sind* [Dieh07].

Die wissenschaftliche Visualisierung (scientific visualization oder SciVis) bezieht sich dabei meist auf physikalische Daten. Daraus entwickelte sich die Informationsvisualisierung, welche die nicht-physikalischen Daten betrachtet. Nach CARD ET AL. beschreibt die Informationsvisualisierung *die Nutzung computergenerierter, interaktiver, visueller Repräsentationen von abstrakten, nicht-physikalischen Daten zur Verstärkung des Erkenntnisgewinns* [CaMS99].

Die Grenzen zwischen SciVis und InfoVis verschwimmen dabei, allerdings unterscheiden sie sich oft in den Nutzergruppen [PrDa10].

### 2.5.1. Datentypen

Die Informationsvisualisierung unterscheidet zwei wesentliche Datentypen: die kategorischen und quantitativen Daten, wobei die kategorischen weiter in nominale und ordinale Daten unterteilt werden [PrDa10].

*Kategorische Daten* dienen meist der Beschreibung oder Gruppierung. Hunderassen oder Staaten sind Beispiele für nominale Daten. Sie können auf Übereinstimmung getestet werden, lassen sich aber nicht wie ordinale Daten ordnen. Ordinale Daten hingegen lassen sich in einer „Richtung“ ordnen, wie beispielsweise Wochentage. Keine der beiden Kategorien lässt sich jedoch messen. Als Visualisierungsmethode eignet sich zum Beispiel die Zuordnung von Primärfarben, wie sie bei politischen Ansichten von Weltkarten genutzt werden.

*Quantitative Daten* lassen arithmetische Operationen zu, da sie über einen Wertebereich verfügen. Sie können geordnet und klassifiziert werden. Als Beispiel kann die Temperaturverteilung über ein Jahr genommen werden. Die Werte können gemessen und mit ihnen kann gerechnet werden. Als Visualisierung dient hierbei beispielsweise eine Farbskala, auf der die diskreten oder kontinuierlichen Werte abgebildet werden [Mazz09], [PrDa10].

## 2.6. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen erörtert, die für das Verständnis der Thematik der vorliegenden Arbeit notwendig sind. Dazu wurden Themen wie Infrastruktur und georeferenzierte Visualisierung erläutert. Auf die technischen Aspekte der 3D-Visualisierung wurde eingegangen und die physikalischen Grundlagen von Schall beleuchtet. Betrachtungen im Hinblick auf Datenvisualisierung wurden ebenfalls ange stellt.

Nachdem die Grundlagen zusammengetragen sind, werden weitere wissenschaftliche Arbeiten, welche sich mit ähnlichen Themen auseinandersetzen, untersucht, um einen umfassenden Einblick in die Materie und deren Anforderungen zu gewinnen.

### 3. Verwandte Arbeiten

Es existieren multiple Arbeiten, welche sich mit Schallemissionen befassen. Ebenso gibt es etliche Arbeiten, die sich mit virtueller Realität auseinandersetzen. Die Kombination beider Themenbereiche ist allerdings dünn besiedelt. Einen Auszug der verwandten Arbeiten wird im Folgenden beschrieben.

In „*Virtual Reality für Urban Sound Design*“ beleuchtet LLORCA die Möglichkeiten der virtuellen Realität als Mittel beziehungsweise Werkzeug, welches Architekten und Infrastrukturplanern helfen soll, Lärm und dessen Auswirkungen bereits vor der Konstruktion zu visualisieren und zu auralisieren. Er betrachtet Prinzipien und auch einige Anwendungen von VR im urbanen Sounddesign. Er kommt zu dem Schluss, dass, auch wenn im Bereich der Architekturakustik bereits umfangreiche Forschungsergebnisse existieren, nur eine sehr geringe Nutzung dieser in der Realität erfolgt [Llor18].

RUOTOLO ET AL. untersuchen in ihrer Studie die Auswirkungen eines virtuellen Bauprojekts auf den Menschen. Dazu wurden Testpersonen in einer virtuellen Umgebung tatsächlich existierende Landschaften vorgeführt und im Anschluss das geplante Bauprojekt in dieselbe Landschaft integriert. Die Reaktionen dieser Testpersonen in Bezug auf den Lärm, welcher aus einem solchem Projekt resultieren würde, wurden hinsichtlich objektiver kognitiver Maßstäbe und subjektiver Empfindungen bewertet. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die in die virtuelle Umgebung projizierte Autobahn negative Auswirkungen auf die Testpersonen bezüglich des Wohlbefindens und der Lärmbelästigung zur Folge hatte. Da die Ergebnisse mit Studien übereinstimmen, welche in realen Umgebungen durchgeführt wurden, wird gesagt, dass eine immersive virtuelle Umgebung als funktionierende Möglichkeit zur Simulation der Auswirkungen von Lärmimmissionen angesehen werden kann. So können Planer und Entwickler mögliche negative Einflüsse geplanter Infrastrukturen im Vorfeld analysieren und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen [RMDI13].

Die Studie von SCHIEWE ET AL. hat zum Ziel, Defizite aktueller Lärmkarten zu eruieren. Probleme dabei sind beispielsweise die Übertragung akustischer Werte auf grafische Darstellungen oder die für Laien schwer verständliche Logarithmierung des Schalldrucks. Die Studie analysiert vorhandene Lärmkarten und gibt im Ergebnis Empfehlungen für die Darstellung und kar-

tografische Gestaltung dieser. So empfehlen sie unter anderem eine entsprechende Farbkodierung der Lärmpegel, die sich an den Farben der Ampel orientiert oder Legenden mit Referenzwerten beziehungsweise qualitativen Informationen, um das Verständnis des logarithmierten Pegels verständlicher zu machen. Bei den Empfehlungen wird auch Wert auf die Verständlichkeit in Bezug auf die Öffentlichkeitsbeteiligung gelegt [ScWK12].

Da es verschiedene Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung gibt, wurden auch diese eingehender betrachtet. Die Auswirkungen von Wänden und anderen Festkörpern wird umfangreich in diversen Lehrbücher zu Akustik oder Bauphysik betrachtet, siehe beispielsweise HÄUPL ET AL. oder MÖSER [HHHK17], [Möse15]. Die Dissertation von FENG bietet dazu einen anderen interessanten Ansatz. In dieser wird der Einfluss von Wald auf die Schallimmissionen untersucht. Er beschreibt darin die unterschiedlichen Effekte, aus welchen sich die akustische Wirkung von Wald zusammensetzt. Dabei kombiniert er messtechnisch ermittelte Werte aus Feldexperimenten mit virtuellen Modellstudien, bei denen computergenerierte, hoch aufgelöste Baummodelle untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass einem Wald eine für die infrastrukturelle Planung relevante Schallschutzwirkung zugeschrieben werden kann [Feng16].

Die Arbeit von SPÄH ET AL. setzt sich mit der Wirkung von Pflanzen, speziell mit Hecken und Büschen, als Schallschutzmaßnahme auseinander. Dabei werden unter anderem die Blattgröße bezogen auf die Fläche oder auch die Dichte der Belaubung hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht. Messungen unter idealisierten Laborbedingungen fanden ebenso statt, wie an realen Hecken in der Natur. Im Ergebnis zeichnet sich eine Reduktion des Schalldruckpegels ab, welcher speziell bei Frequenzen ab 500 Hz spürbar wird. Zusätzlich wird festgestellt, dass Hecken als Mittel zum Schallschutz noch über einen psychologischen Effekt verfügen. So werden die Summenpegel des Lärms mit Hecke als deutlich weniger lästig wahrgenommen [SWOL11].

LENTZ ET AL. entwickeln in ihrer Arbeit ein Echtzeit-Audio-Rendering-System, welches eine raumspezifische Simulation für eine virtuelle akustische Bildgebung ermöglicht. Dieses System agiert unabhängig von der Annahme eines diffusen Schallfeldes. Sie gehen darin auch auf komplexe, spezifische Situationen, wie bewegte Schallquellen außerhalb des Sichtfeldes des Nutzers, ein und zeigen, dass die Simulation und Reproduktion des Raums in Echtzeit erfolgen kann. Erreicht wird dies durch die Einführung eines flexiblen Frameworks zur interaktiven Auralisation in virtuellen Umgebungen [LSVA07].

Software und Systeme zur Lärmkartierung existieren bereits. Die Software CadnaA (Computer Aided Noise Abatement) der Firma DataKustik beispielsweise verwendet digitale Geländemodelle (DGM) und statistische Daten über Verkehrsaufkommen, Einwohnerzahl, spezielle örtliche Gegebenheiten wie Straßenbeschaffenheit und weitere Faktoren zur Berechnung, Darstellung, Beurteilung und Prognose von Umgebungslärm [www\_05]. Diese zeigen aber keine Möglichkeiten, den Schall auch hörbar darzustellen, was dem Verständnis der Abbildung durch Laien abträglich ist.

### **3.1. Zusammenfassung**

LLORCA zeigt in seinen Ausführungen, dass die Möglichkeiten von VR im Bereich von Planung und Entwicklung noch längst nicht ausgeschöpft sind. Somit trägt der Ansatz dieser Arbeit dazu bei, diese zu erweitern. Auch RUOTOLO ET AL. bestätigen den hohen Nutzeffekt von VR als Präsentations- und Kommunikationsplattform. Weiterführende Entwicklungen im Bereich der akustischen Visualisierung, wie sie in dieser Arbeit verfolgt werden, speziell auch im Hinblick auf die Aspekte der Teilhabe und Inklusion der Öffentlichkeit, stellen demnach bereits in den frühen Planungs- und Entwicklungsphasen von Infrastrukturprojekten einen wichtigen Mehrwert für zukünftige Projekte dar. Die Einsichten aus der Studie von SCHIEWE ET AL. zur Nutzung von Farben und anderen Darstellungsparametern für die Visualisierung von Schallemissionen finden in dieser Arbeit Anwendung. Die angeführten Arbeiten beziehen sich dabei vorwiegend auf die grafische Visualisierung.

Die Erkenntnisse von SPÄH ET AL. und FENG bezüglich der Auswirkungen von Bewuchs in Form von Bäumen oder Hecken fließen in die Berechnungsmodelle dieser Arbeit mit ein. Sie erlauben es, die Darstellungen von Schallemissionen in einer virtuellen Umgebung noch wirklichkeitsgetreuer zu gestalten. Die Entwicklungen von LENTZ ET AL. ermöglichen eine realistischere Darstellung von Schallemissionen unabhängig von der Form des Raums. So kann Schall in der VR naturgetreu wiedergegeben werden. Ihre Ansätze bieten die Möglichkeit, die in dieser Arbeit verwendete Vorgehensweise zukünftig noch zu erweitern.

Der in dieser Arbeit Anwendung findende Ansatz bezieht die akustische Präsentation von Schall bei dem Einsatz von virtuellen Umgebungen mit ein und grenzt sich damit von den vorher beschriebenen Arbeiten ab. Durch die Auralisation des Schalls wird ein wesentlich höherer Immersionsgrad erreicht und ein tiefergehendes Verständnis der Auswirkungen von Schallemissionen durch den Nutzer gewährleistet. Dies erweitert und verbessert die Verwendungsoptionen von VR im Planungs- und Entwicklungsbereich.

## **4. Konzeptionierung**

Im Verlauf der Konzeptionierung wird die Aufgabenstellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, weiter präzisiert. Es werden dementsprechend Anforderungen an das zu konzeptionierende, in einer virtuellen Umgebung zu verwendende Werkzeug erarbeitet. Aus den genannten Anforderungen wird ein Lösungskonzept entwickelt und dieses detaillierter beschrieben.

### **4.1. Detaillierung der Aufgabenstellung**

Daten zu Infrastrukturen und vielen anderen Bereichen sind in großen Mengen verfügbar. Diese anschaulich darzustellen beziehungsweise verständlich zu visualisieren, wird in vielen Bereichen bereits durch multiple Ansätze realisiert (siehe 2.1).

Auch im Bereich der Schallemissionen in Verbindung mit Infrastrukturen existieren bereits Visualisierungsformen. So werden bei der Erstellung von Lärmgutachten die ermittelten Werte über die zu erwartende Geräuschbelastung meist in tabellarischer Form ausgedrückt. Die Interpretation solcher Tabellen stellt für Nichtfachleute eine enorme Herausforderung dar, welche oft nicht gemeistert werden kann. Durch den Einsatz eines VR-Systems wird ein weitaus umfassenderes Bild der aktuellen beziehungsweise zukünftigen Situation hinsichtlich der Geräuschbelastung gezeichnet, wodurch der Nutzer die Auswirkungen der Schallemissionen „erleben“ kann.

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzepts für ein Werkzeug zur Visualisierung verschiedener, zu erarbeitender Parameter von Schallemissionen im Kontext der infrastrukturellen Planung. Die konzeptionierten Lösungen sollen an einem virtuellen Modell eines infrastrukturellen Systems an einem Beispiel aus Sachsen-Anhalt demonstriert werden.

Schallemissionen und deren Auswirkungen so zu visualisieren, dass eine hohe Immersion des Nutzers realisiert wird, ist ein weiterer Anspruch dieser Arbeit. Dazu müssen Darstellungs- und Interaktionsmöglichkeiten geschaffen werden, die es dem Nutzer ermöglichen, die gewonnene Datenvisualisierung zu interpretieren. Dazu ist es hilfreich, unterschiedliche Detaillierungsstufen bereitzustellen. Dem Nutzer wird eine Visualisierungsform zur Verfügung gestellt, welche von ihm individuell angepasst werden kann. Im Kontext der Planung derartiger Projekte muss das zu konzeptionierende Werkzeug nicht nur einen darstellenden Charakter aufweisen, es soll gleichermaßen als Präsentations- und Kommunikationsplattform dienen.

Es sind Visualisierungstechniken zu identifizieren, welche Schallemissionen in geeigneter Weise abbilden. Das Konzept ist modular auszulegen, um bei Bedarf Erweiterungen einzupflegen und die Nutzungsmöglichkeiten auszubauen. Die Anwendung ist so zu konzipieren, dass eine einfache Nutzbarkeit der Applikation auch für Nichtexperten gewährleistet wird.

Weiterhin ist das Interface der Anwendung so zu gestalten, dass eine intuitive Bedienung in einer virtuellen Umgebung sichergestellt ist.

## **4.2. Anforderungen**

Die Anforderungen, welche sich aus der Aufgabenstellung ergeben, werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert. Dazu werden diese unterteilt in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen [ISO\_11]. Weiterhin werden die relevanten Parameter definiert, welche zur Visualisierung von Schallemissionen notwendig sind. Die erforderlichen Visualisierungs- und Interaktionstechniken werden hier detailliert beschrieben.

### **4.2.1. Funktionale Anforderungen**

Die funktionalen Anforderungen umfassen die Leistungen beziehungsweise Funktionalitäten, welche das Werkzeug bereitstellen soll [Goll11].

Das Werkzeug muss Schallemissionen visualisieren, sowohl optisch als auch akustisch. Es müssen geeignete Visualisierungstechniken gefunden werden, welche die Emission anschaulich und verständlich abbilden.

Die Aufgabenstellung sieht die Nutzung einer virtuellen Umgebung vor. Daher muss die Anwendung so ausgelegt sein, dass sie auf einem VR-System lauffähig ist. Das angestrebte VR-System ist der Elbedome, ein stereoskopisches 360°-Projektionssystem des Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. Die Präsentationsmöglichkeiten sollen nicht ausschließlich auf den Elbedome beschränkt sein. Die Verwendung des Werkzeugs auf Tablets ist ebenfalls anzustreben.

Die Plattform Unity3D, auf welcher die Anwendung basieren wird, wird auf Wunsch des Kooperationspartners, des Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, gewählt. Dabei handelt es sich um eine 3D-Echtzeit-Entwicklungsumgebung, einer sogenannten Game-Engine. Sie ermöglicht die Entwicklung von interaktiven 3D-Anwendungen und kann weitestgehend betriebssystemunabhängig genutzt werden. Mit ihr können Anwendungen für PC-Systeme, mobile Geräte, Spielekonsolen und Webbrowser realisiert werden.

Basierend auf einem Rumpf-Szenario, welches grundlegende VR-Interaktions- und VR-Visualisierungsmechanismen bereitstellt, sollen spezifisch für die Aufgabenstellung weitere Funktionalitäten entwickelt werden. In dem Rumpf-Szenario sind bereits Interaktionsmöglichkeiten des Nutzers integriert. Dieser kann in die Lage versetzt werden, mit der Anwendung zu interagieren. Beispiele dafür sind ein Szenenwechsel, Navigation innerhalb der dargestellten 3D-Szene oder der Aufruf von zusätzlichen Informationen. Der Nutzer kann sich innerhalb des von ihm gewählten Szenarios bewegen beziehungsweise seine Position relativ zum Weltkoordinatensystem verändern.

Es sind Marker und Infrarot-Kameras zu verwenden, um das Tracking von Nutzern zu realisieren. Hierfür soll das im Elbedome bereits integrierte Lighthouse 2.0 System und das markerbasierte Tracking von Vicon verwendet werden. Das ist notwendig, um die Daten des Nutzers hinsichtlich seiner Position und Ausrichtung genau zu erfassen.

Audioquellen sind in unterschiedlichen Lautstärken und auch in verschiedenen Anzahlen darzustellen. Bei der Nutzung des Elbedomes müssen Soundquellen mittels des 7.1-Soundsystems unterschiedliche Positionen vermitteln und auch hörbar Bewegung simulieren. Die Tonausgabe bei der Nutzung der Anwendung auf einem Tablet erfolgt über Kopfhörer. Die Anwendung muss daher in der Lage sein, unterschiedliche Soundquellen abzubilden, beispielsweise LKW und PKW. Auch Einflüsse der Umgebung, wie Schallreflexion oder Schalldämpfung, sollen abgebildet werden – beispielsweise der Einfluss von Schallschutzwänden. Die akustischen Parameter der Schallquelle sowie deren Anzahl sind ebenfalls einstellbar, um Schallemissionen und deren Auswirkungen aufzuzeigen. Das zu entwickelnde Werkzeug soll dadurch Schallemissionen in einer virtuellen Umgebung „erlebbar“ machen.

Es kommen unterschiedliche Visualisierungsmechanismen zum Einsatz. Sowohl akustische Hilfsmittel, wie beispielsweise die Lautstärke von Soundfiles, als auch visuelle Methoden, wie unter anderem eine farbliche Überlagerung, müssen Anwendung finden. Die visuelle Darstellung der Schallemissionen soll mit einer farblichen Staffelung darstellbar sein. Dafür muss eine Möglichkeit geschaffen werden, Schwellenwerte für die Lautstärkepegel administrativ festzulegen, welche auf die Farbwerte abgebildet werden.

Die Möglichkeit, eine Nutzerunterstützung aufzurufen und mit dieser zu interagieren, ist ebenfalls zu integrieren. Dazu ist ein entsprechendes Interface zu entwickeln. Dieses soll ein- und ausblendbar sein. Über das Interface müssen ausgewählte Parameter des Szenarios anpassbar sein. Diese Parameter sollen leicht zu- und wieder abgeschaltet werden können.

Weiterhin ist eine Zoomfunktion zu implementieren, sodass Zusammenhänge aus unterschiedlichen Detaillierungsstufen betrachtet werden können. Das Werkzeug muss also in der Lage

sein, eine 3D-Szene in unterschiedlichen Darstellungsebenen abzubilden. Diese Ebenen sind dabei wie folgt definiert:

### *Objektebene*

Die Objektebene beschreibt ein bestimmtes Objekt, beispielsweise eine Fabrik oder das Gebäude eines Firmensitzes. Sie stellt die kleinste darstellbare Ebene dar und ist damit vom Detaillierungsgrad am höchsten angesiedelt.

### *Standortebene*

Sie beschreibt einen wirtschaftlichen Standort, wie eine Stadt, in welcher sich eine Firma angesiedelt hat oder ein Gebiet, in dem eine Fabrik neu gebaut wird.

### *Regionalebene*

Die Regionalebene stellt, wie der Name es impliziert, die Darstellung einer ganzen Region, beispielsweise eines Bundeslandes, dar und ist damit die größte Darstellungsebene. Auf ihr können Auswirkungen von mehreren Standorten dargestellt werden.

Die Anwendung soll über eine Speicherfunktion verfügen, um zu gewährleisten, dass zuvor getätigte Änderungen in den Einstellungen des Szenarios erneut aufrufbar sind. Dadurch wird eine erleichterte Bedienung und eine erhöhte Nutzerzufriedenheit erreicht.

Die Barrierefreiheit der Anwendung, speziell im Hinblick auf Farbfehlsichtigkeit, wird durch entsprechende Funktionalität sichergestellt. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass es bei akustischer Lärmdarstellung zu keinen Hörschäden bei Nutzern kommt. Dies wird durch passende Sicherungsfunktionen gewährleistet.

Die Anwendung muss es ermöglichen, Schallemission darzustellen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu präsentieren. Damit soll eine Kommunikation der Ergebnisse und auch ein Austausch der Nutzer untereinander ermöglicht werden. Dem Nutzer wird so die Möglichkeit eröffnet, an Planungs- und Entscheidungsprozessen teilzuhaben.

## **4.2.2. Nicht-funktionale Anforderungen**

Nicht-funktionale Anforderungen zielen auf Qualitäten der Anwendung ab, wie beispielsweise die Gebrauchstauglichkeit oder Effizienz [Goll11].

Ein wichtiges Merkmal, welches die Anwendung bieten soll, ist die Modularität. Es muss sichergestellt sein, dass zusätzliche Module eingepflegt und die Anwendung nachträglich erweitert werden kann. Dies gilt nicht nur für das Hinzufügen von neuen 3D-Szenarien, sondern auch für das Hinzufügen neuer oder geänderter Funktionalitäten.

Das Werkzeug muss so ausgelegt sein, dass auch Nichtexperten die Anwendung nach einer kurzen Einweisung problemlos benutzen können. Eine intuitive Bedienung ist daher durch eine

entsprechende Interfacegestaltung zu gewährleisten. Zusätzlich soll der Umfang der Bedienelemente geringgehalten werden, um die Nutzung so einfach wie möglich zu gestalten. So können Inhalte besser herausgestellt werden und der Nutzer wird nicht von Bedienelementen abgelenkt. Die Anwendung unterstützt die Ausführung von Aufgaben und die Selbstbeschreibungsfähigkeit ist ebenso sicherzustellen.

Erwartungskonformität ist eine weitere Anforderung und wird durch die Einhaltung von Konventionen zur Softwareentwicklung erreicht, wie sie beispielsweise in der ISO 25010 festgeschrieben sind. Die Anwendung muss konsistent angelegt sein, das heißt, eine Funktion arbeitet in allen Bereichen gleich. Selbiges gilt für die angezeigten Informationen. Ebenso sollen nicht verfügbare Funktionen entsprechend gekennzeichnet werden. Fehlertoleranz ist ebenfalls eine Anforderung. Durch eine Dialoggestaltung, die es dem Nutzer ermöglicht, Falscheingaben zu minimieren, wird dies gewährleistet.

Das Interface muss nicht nur intuitiv und leicht zu bedienen sein, es soll außerdem auch über eine ansprechende Gestaltung verfügen. Diese wird sich dem modernen Gebrauchsverhalten der Nutzer anpassen. Das heißt, es verfügt über Elemente, die dem Nutzer von anderen Anwendungen bereits bekannt sind und mit deren Nutzung er bereits vertraut ist.

Die Anwendung soll performant sein. Das heißt, die virtuelle Umgebung wird „ruckelfrei“ dargestellt, um eine möglichst hohe Immersion des Nutzers zu gewährleisten.

### **4.2.3. Daten und Parameter**

Die zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen notwendigen Daten und Parameter werden spezifiziert und im Folgenden näher erläutert. Dabei werden Daten als festgelegte Informationen definiert, welche im Vorhinein erhoben wurden. Parameter dagegen sind veränderbare Werte und Faktoren, die vom Nutzer angepasst werden können und situationsspezifisch die gegebenen Daten verändern und damit die Auswirkungen der Veränderung sichtbar machen.

#### ***Daten***

Die Daten von 3D-Modellen des Geländes beziehungsweise des Szenarios liegen in verschiedenen Detaillierungsstufen vor. Die unterschiedlichen Level of Detail (LOD) sind notwendig um die Rechenleistung und -geschwindigkeit für eine annähernde Echtzeit-Darstellung zu ermöglichen. Die Daten der 3D-Modelle von Objekten, wie Fahrzeugen, liegen ebenfalls in verschiedenen LODs vor. Positionsdaten von Objekten oder dem Nutzer liegen in Koordinatenform vor.

Daten zu Schallemissionen von Objekten, wie Fahrzeugen oder Fabrikanlagen, werden aus unterschiedlichen Quellen herangezogen. Dabei kommen sowohl Angaben von Herstellern, als

auch messtechnisch ermittelte Daten in Frage. Daten aus bereits erzeugten Lärmkarten von Bund und Ländern, wie sie die Verordnung über die Lärmkartierung [BISV06] gemäß der Richtlinie 2002/49/EG vorschreibt, sind ebenso eine geeignete Quelle für Schallemissionswerte.

### ***Parameter***

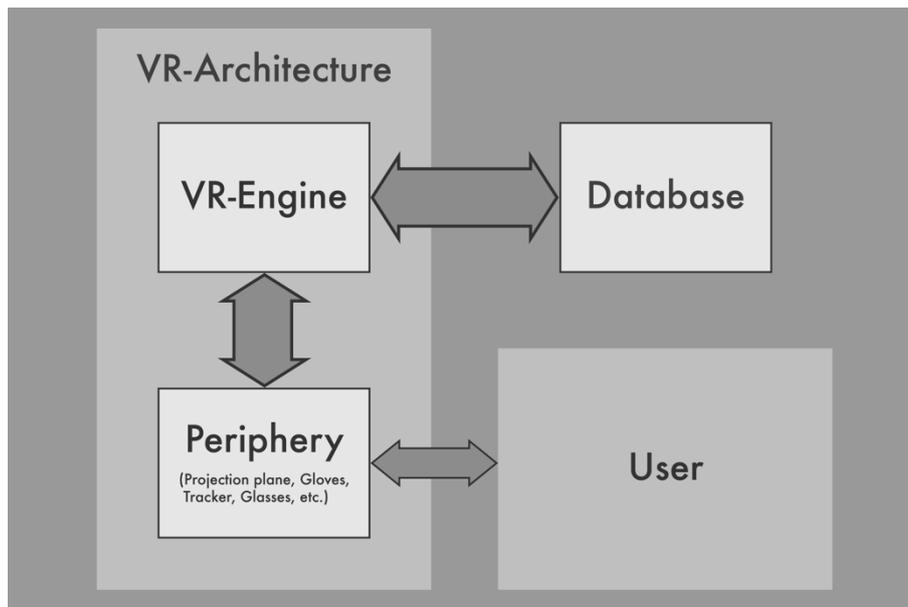
Als einstellbare Parameter sind beispielsweise Objekte, die Schallemissionen, -reflexionen beziehungsweise -dämpfung verursachen. Diese Parameter ändern sich je nach gewähltem Objekt beziehungsweise Hindernis. So unterscheiden sich beispielsweise Bäume oder Büsche stark von einer Schallschutzwand in Bezug auf die Schalldämpfung. Auch die Anzahl von Schallquellen ist ein einstellbarer Parameter, da sich die Pegel addieren. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Objekte bewegen, ist ebenfalls modifizierbar. Der Grund dafür ist der Unterschied der Schalldruckpegel bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Art der Schallquelle, beispielsweise ob es sich um einen LKW oder einen PKW handelt, ist gleichermaßen einstellbar. So variieren die Arten hinsichtlich ihrer Schalldruckpegel und Frequenzen.

## **4.3. Herleitung der Lösung**

Das Ziel der zu entwickelnden Anwendung ist die Parametervisualisierung von Schallemissionen in einer virtuellen Umgebung. Dazu wird erst auf den Grundaufbau des Systems eingegangen. Danach werden die Ebenen und die Logik hinter der Schalldarstellung erläutert. Die Gestaltung des Interface wird beschrieben und auf die Bedienkonzepte und die Navigation eingegangen. Abschließend werden anhand von Beispielen die Einsatzmöglichkeiten gezeigt.

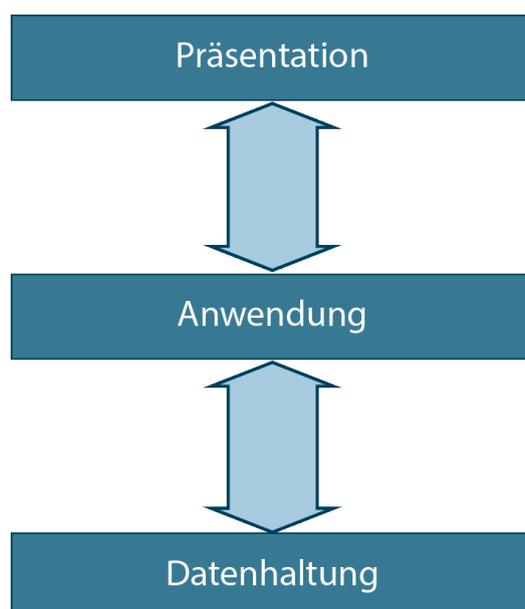
### **4.3.1. Grundaufbau**

Das dabei zum Einsatz kommende VR-System kann grob wie folgt beschrieben werden. Es besteht aus einer Ein- und Ausgabeschicht, welche die Peripherie beinhaltet. Darunter sind Projektionsflächen und Bildschirme als Ausgabe-, Handschuhe, VR-Controller, Tracker und Marker und weitere als Eingabeschicht zu verstehen. Die Befehle des Nutzers werden durch die Eingabegeräte interpretiert und an die Verarbeitungsschicht übermittelt. Diese umfasst die VR-Engine und die Datenbank (Abb. 9). Nach der Verarbeitung werden die Ergebnisse wieder an die Ausgabeschicht, die Projektionsflächen oder Bildschirme, gesendet. Der Nutzer erfasst und analysiert diese.



**Abb. 9:** Struktur eines VR-Systems (angelehnt an [Bril09], [DBGJ19])

Wird das Schichtenmodell der Systemarchitektur betrachtet (Abb. 10), so liegt das Hauptaugenmerk auf den beiden oberen Schichten, der Präsentations- und der Anwendungsschicht. In der Datenhaltungsschicht werden die erforderlichen Daten wie beispielsweise Geometrien, Schalldruckpegel, Geschwindigkeiten abgelegt. Die Anwendungsschicht, oder auch Logikschicht beinhaltet Verarbeitungsmechanismen, die notwendig sind, um die gewünschten Berechnungen und Funktionen auszuführen. Dazu werden die Daten aus der untersten Schicht abgerufen, verarbeitet und die Ergebnisse an die Präsentationsschicht weitergegeben beziehungsweise wieder in der Datenhaltungsschicht gespeichert. Die Präsentationsschicht stellt die Oberfläche für den Anwender, das Graphical User Interface (GUI), dar. Auf dieser Ebene erfolgt die direkte Interaktion mit dem Nutzer. Seine Eingaben werden vom GUI interpretiert, an die Anwendungsschicht übermittelt und verarbeitet. Die Ergebnisse werden auf entsprechenden Ausgabegeräten wie Projektionswänden oder Bildschirmen präsentiert.



**Abb. 10:** Schichtenmodell der Systemarchitektur (angelehnt an [Stro08])

Die VR-Architektur umfasst den Elbedome mit seinem 360° Projektionsraum und seiner Peripherie. Der Elbedome verfügt über mehr als 30 High-End Cluster-PCs zur Bilderzeugung und für Berechnungen mit einer Leistung von etwa 400 TFlop/s. Von dort werden die 25 Projektoren für Wand- und Bodenprojektionen gesteuert. Ein 7.1 Audiosystem aus 20 Hoch- und Mitteltönern und 3 Subwoofern dient zur Wiedergabe von räumlichen Geräuschquellen. 15 Infrarotkameras erfassen Personen und Marker zur Interaktion. Im Elbedome findet ein Manus VR Handschuh und ein speziell entwickelter Marker für das Handgelenk des Nutzers Anwendung. Mittels dieser Ausrüstung lässt sich auch Gestensteuerung realisieren. Durch spezielle Brillen, welche mit Markern ausgestattet sind, kann sowohl die Position als auch die Ausrichtung des Nutzers in Relation zum Elbedome erfasst und verarbeitet werden. Als VR-Engine wird die Plattform Unity3D eingesetzt, welche zusammen mit der Datenbank auf dem Rechencluster des Elbedome liegt.

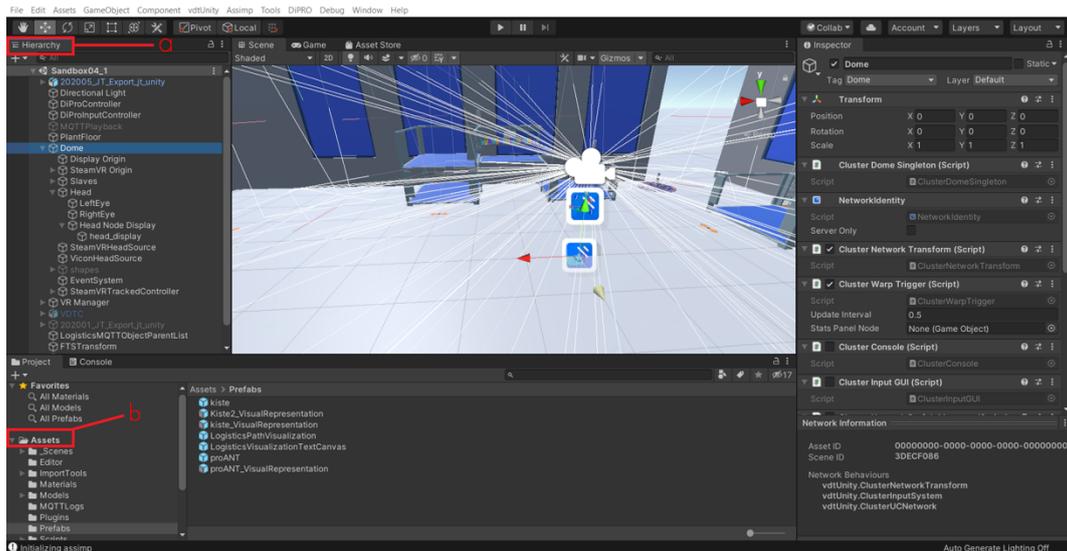
Das zweite System besteht aus einem Tablet (Microsoft Surface Pro) mit berührungssensitivem Bildschirm, einem gyroskopischen Sensor, einer GPS-Funktion und einer Bluetooth-Schnittstelle zur Tonwiedergabe durch Kopfhörer. Die Tablet-Version ermöglicht eine ortsunabhängige Nutzung und auch eine Präsentation der Anwendung am Ort des Geschehens.

#### **4.3.2. Vorbereitung von Szenarien**

Zu Beginn erfolgt die Vorbereitung der zu simulierenden Szenarien. Dazu wird ein digitales Geländemodell (DGM) im entsprechenden Dateiformat, beispielsweise im \*.fbx- oder \*.obj-

Format, benötigt. Diese Daten werden, unter anderem, vom Landesvermessungsamt zur Verfügung gestellt. Hochaufgelöste Standortinformationen können ebenfalls durch spezielle Vermessungsbüros erzeugt oder eigenständig modelliert werden. Das DGM enthält alle relevanten Daten der zu visualisierenden Situation. Es entspricht den Gegebenheiten der aktuellen Realität. So sind alle Gebäude, Straßen und Landschaftsparameter, wie Bäume oder anderer Bewuchs, angelegt. Das Level of Detail (LOD) der 3D-Objekte wird entsprechend der gewählten Betrachtungsebene bestimmt. Des Weiteren bedarf es der Objekte, die als Schallemissionsquellen fungieren. Dabei handelt es sich beispielsweise um Kraftfahrzeuge, wie LKW und PKW, aber auch Schienenfahrzeuge oder Gebäude, wie Fabriken oder Produktionsstätten. Diesen 3D-Objekten sind Schallquellen zugeordnet, welche über einen bestimmten Schalldruckpegel und eine bestimmte Frequenz verfügen. Die Werte dafür können messtechnisch ermittelt oder von Herstellern abgefragt werden und sind in einer Datenbank hinterlegt. Beim Import der Audioquellen erfolgt eine Umrechnung der gemessenen Werte. Da Geräuschquellen in einem gewissen Abstand gemessen werden, muss dieser Abstand herausgerechnet werden, so dass der Schalldruckpegel, beispielsweise das Motorgeräusch eines LKW, dem Ursprungsort entspricht. Das ist notwendig, um die Schallquelle in der VR mit den gleichen Positionsdaten zu nutzen, welche das 3D-Objekt besitzt.

Die Plattform Unity3D bietet ein Interface, welches es ermöglicht komplette 3D-Szenen zu erstellen. Dazu bietet Unity3D eine Projektordnerstruktur an. In einem dieser Ordner, den Assets (Abb. 11.b), werden unter anderem 3D-Modelle, Materialien, Texturen, Skripte und Plugins gespeichert. Mit Hilfe dieser Struktur werden alle relevanten Daten importiert und können so in das zu gestaltende Szenario eingefügt werden. Unterstützt wird dies durch die hierarchische Anzeige der Game Objects (Abb. 11.a).



**Abb. 11:** Interface und Projektordnerstruktur Unity3D

a: Hierarchie der Objekte, b: Assets der Game Objects

Sind alle relevanten Daten importiert, wird mit dem Aufbau der Szenerie begonnen. Dazu werden alle Objekte im virtuellen Raum platziert und mit entsprechenden Skripten und Funktionen verknüpft. Auf einige der Skripte und Funktionen wird in späteren Abschnitten genau eingegangen.

### 4.3.3. Darstellungsebenen

Die Anwendung verfügt über unterschiedliche Darstellungsebenen, die Regionalebene, die Standortebene und die Objektebene. Jede Ebene verfügt über ihren eigenen Detaillierungsgrad. Das LOD orientiert sich dabei an der City Geography Markup Language (CityGML). Im Folgenden werden die Ebenen näher erläutert, um die Merkmale und Einsatzmöglichkeiten der Ebenen aufzuzeigen.

#### *Regionalebene*

Die Regionalebene ist die größte Darstellungsebene. Sie dient der Abbildung einer Region wie eines Bundeslandes oder eines Landkreises. Die Darstellung der Geometrien erfolgt im LOD 0 oder LOD 1. Das bedeutet, es wird ein 2,5D-Geländemodell oder ein Klötchenmodell aus extrudierten Grundflächen verwendet. Diese werden grau dargestellt oder in einfachen Farben, verfügen aber über keine detaillierten Texturen.

### ***Standortebene***

Bei der Standortebene handelt es sich um die mittlere Darstellungsebene. Sie bildet einen Wirtschaftsstandort ab, beispielsweise eine Stadt oder einen Stadtteil. Die verwendete Stufe 2 des LOD zeigt die Umgebung mit 3D-Modellen der Gebäude und Straßen. Es kommen einfache Dachstrukturen und simple Texturen zum Einsatz.

### ***Objektebene***

Die kleinste darstellbare Ebene ist die Objektebene. Auf ihr werden Ausschnitte eines Standortes, wie beispielsweise ein Straßenzug oder eine Industrieanlage dargestellt. Sie verfügt über die höchste Stufe, LOD 3. Dabei werden Architekturmodelle von Gebäuden und deren Umgebung visualisiert, welche mit detaillierten Texturen belegt sind.

Da sich der Nutzer bei Verwendung der Regional- oder Standortebene virtuell sehr weit entfernt von den eigentlichen Schallquellen befindet, ist eine akustisch realistische Darstellung kaum möglich und wird auch als nicht zielführend betrachtet. Auf diesen beiden Ebenen greift die optische Darstellung der Schallemission durch Farbüberlagerung am deutlichsten. Dazu werden die Schallemissionen gemäß der aus Lärmgutachten ermittelten Werte abgebildet. So lassen sich die Auswirkungen von Schallemissionen in unterschiedlichen Situationen am besten visualisieren und erfassen. Um das Verständnis zu erhöhen, kann im Anschluss auf die Objektebene gewechselt werden. Im Gegensatz dazu ist die Farbdarstellung auf der Objektebene nur sehr bedingt hilfreich. Hier ergeht die Empfehlung, auf die farbige Überlagerung zu verzichten, um die Immersion des Nutzers deutlich zu erhöhen. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass Lärm in der realen Welt nicht sichtbar ist.

## **4.3.4. Schalldarstellung**

Bei der Visualisierung von Schallemissionen müssen zwei Aspekte Beachtung finden: die optische und die akustische Visualisierung. Da Schall ein akustisches Phänomen ist, müssen hierbei natürlich entsprechende Algorithmen zur Anwendung kommen, die eine möglichst naturgetreue Wiedergabe von Emissionsquellen ermöglichen. Schallwellen sind in der realen Welt nicht erkennbar. Um Schallemissionen sichtbar zu machen, müssen Wege gefunden werden, diese auch optisch und insbesondere verständlich darzustellen.

### ***Akustische Darstellung***

Objekte in der virtuellen Umgebung sind in einer Datenbank zusammen mit den dazugehörigen Tondateien hinterlegt. Sie werden beim Erstellen der Szene in Unity3D eingefügt. Diese Objekte werden ähnlich der Biologie kategorisiert. Sie werden in Schallquellen unterteilt, welche Emissionen erzeugen und Objekte, die den Schall reflektieren oder absorbieren beziehungsweise dämpfen. Die Grenzen sind dabei stellenweise fließend, da in der realen Welt auch bewegliche Objekte Schall reflektieren respektive absorbieren können und unbewegliche Objekte wie Gebäude aufgrund der Reflexion zu Schallemitern werden. In der vereinfachten Abstraktion der virtuellen Umgebung wird daher nur zwischen beweglichen und unbeweglichen Quellen unterschieden. Die beweglichen werden hinsichtlich ihrer Ordnung – PKW, LKW oder Schienenfahrzeug – klassifiziert. Diese Unterscheidung erfolgt aufgrund der Tatsache, dass diese verschiedenen Arten über unterschiedlich hohe Lautstärkepegel und Frequenzen verfügen. Sie werden vereinfacht als mobile Schallquellen betrachtet. Unbewegliche Objekte wie Gebäude, Wände oder Bewuchs in Form von Bäumen oder Büschen werden allgemein als Schallreflektoren oder -absorber betrachtet. Ausnahmen stellen hier nur beispielsweise Fabriken dar, da diese Lärm erzeugen können und somit als unbewegliche Schallquelle definiert sind.

Um die Bewegung von Fahrzeugen zu simulieren, werden 3D-Objekte entlang eines vorgegebenen Pfades innerhalb der virtuellen Umgebung einer translatorischen beziehungsweise rotatorischen Positionsveränderung unterzogen. Diesen Objekten sind Schallquellen zugeordnet, welche sich zusammen mit dem Objekt bewegen.

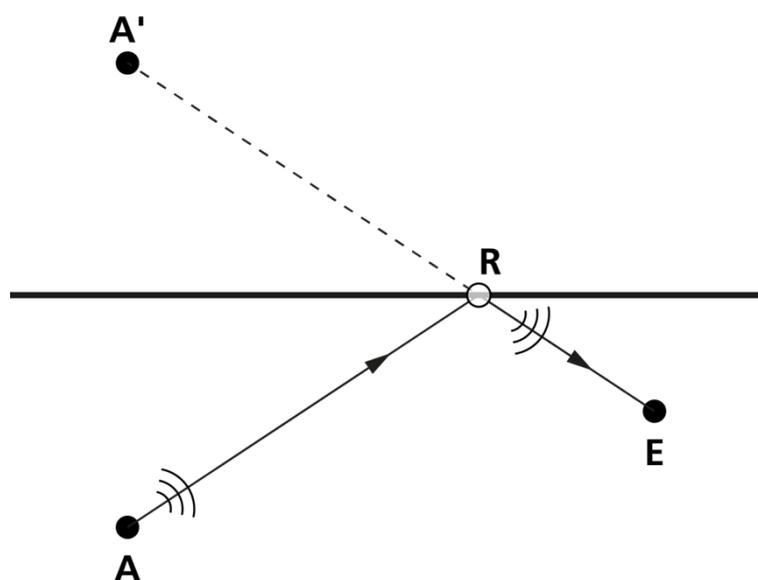
Die Anzahl der Schallquellen spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Werden mehrere Schallquellen gleichzeitig dargestellt, beispielsweise bei einer verkehrsreichen Straße, addieren sich die Pegel der Schallquellen logarithmisch gemäß Gl. (4). Das bedeutet, dass der Pegel von zwei Schallquellen um etwa 3 dB ansteigt, bei fünf um etwa 7 dB, bei zehn etwa um 10 dB und so weiter. So kann deutlich gemacht werden, wie sich eine Reduktion des Verkehrsaufkommens auf ein bestimmtes Gebiet auswirkt. Der Pegel, sowohl von einzelnen Objekten als auch von mehreren, welchen der Nutzer wahrnimmt, wird mit Hilfe der Abstandsfunktion Gl. (3) berechnet. So wird die Bewegung und damit auch die Entwicklung von Schallemissionen möglichst realistisch simuliert.

Um die Schallreflexion an Gebäuden oder anderen Objekten, wie beispielsweise Schallschutzwänden nachzubilden, wird am Punkt des auftreffenden Schalls auf das Hindernis die Ursprungsschallquelle  $A$  dupliziert (Abb. 12). Diese Reflexionsquelle  $R$  erhält den Lautstärkewert, der dem gemäß der Abstandsfunktion Gl. (3) ermittelten Wert der Ursprungsquelle  $A$

entspricht. Dabei erfolgt die Positionierung des Duplikats am Schnittpunkt der Oberfläche des Hindernisses und der gedachten Achse zwischen Nutzer  $E$  und Spiegelschallquelle  $A'$ . So kann dem Nutzer ein realistisches Bild der zu erwartenden Ausbreitung der Schallemissionen geboten werden. Handelt es sich bei dem Objekt um eine Schallschutzwand, wird das Einfügungsdämmmaß der Wand gemäß Gl. (5) berechnet und der Pegel um diesen Wert gemindert.

Die Berechnung der Schallemissionen erfolgt immer für die Position des Nutzers, welche vom System erfasst wird. Bei der Nutzung durch mehrere User im Elbedome sind die Abstände zwischen diesen vernachlässigbar gering, sodass keine zusätzliche Berechnung der Schallemissionen für weitere Nutzer erfolgen muss.

Abhängig vom gewählten Szenario besteht die Möglichkeit, dass Szenen dargestellt werden, die über einen derart hohen Schalldruckpegel verfügen, dass es bei einem Nutzer zu Schädigungen des Gehörs führen kann, wenn er diesem Pegel über einen entsprechend langen Zeitraum ausgesetzt wird. Um einer solchen Situation vorzubeugen, wird während der Nutzung der Anwendung eine Warnung erfolgen, wenn derartige Lautstärken erreicht werden. Diese wird durch eine Einblendung in das Sichtfeld des Nutzers erfolgen beziehungsweise durch eine akustische Mitteilung. Die Dauer eines solchen Pegels wird zeitlich begrenzt, um eine Schädigung des Nutzers zu vermeiden. In der Realität können Geräuschpegel auftreten, die schon nach äußerst kurzen Zeitspannen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen können. Derart hohe Pegel werden nicht abgebildet beziehungsweise mit verringerter Lautstärke dargestellt und mit einem entsprechenden Hinweis versehen.



**Abb. 12:** Schematische Darstellung – Reflexion einer Schallquelle

### ***Optische Darstellung***

Die Schalldruckpegel werden auf das HSB-Farbschema abgebildet. Dieses bildet die Farben auf einem Kreis ab, so dass in einem Bereich von 0° bis etwa 130° die Farben Rot über Gelb bis zu Grün kontinuierlich erzeugt werden. Über eine Umrechnungsfunktion werden die HSB-Werte in RGB-Farbtöne umgerechnet. Diese werden dann genutzt um Objekte in der virtuellen Umgebung mit einer Farbüberlagerung der eigentlichen Textur zu versehen. Dadurch gelingt es, die Auswirkungen von Schallemissionen optisch darzustellen. Die Wahl der Farben Rot, Gelb und Grün erfolgt aufgrund des allgemeinen Verständnisses für das Ampel-Schema. Dieses ist aus dem Alltag sehr gut bekannt und wird gemeinhin korrekt interpretiert. Da Rot vorwiegend auf Gefahr hinweist, stellt es die hohen Schalldruckpegel und damit die großen Belastungen durch Schallemissionen dar. Um allerdings eine Barrierefreiheit bei der Nutzung zu gewährleisten, kann auch auf eine Farbskala mit einem einzigen Farbton gewechselt werden, welche die Lautstärkepegel auf die Intensität beziehungsweise Sättigung des Farbtons abbildet. So kann sichergestellt werden, dass Menschen mit einer Farbsehschwäche nicht benachteiligt werden.

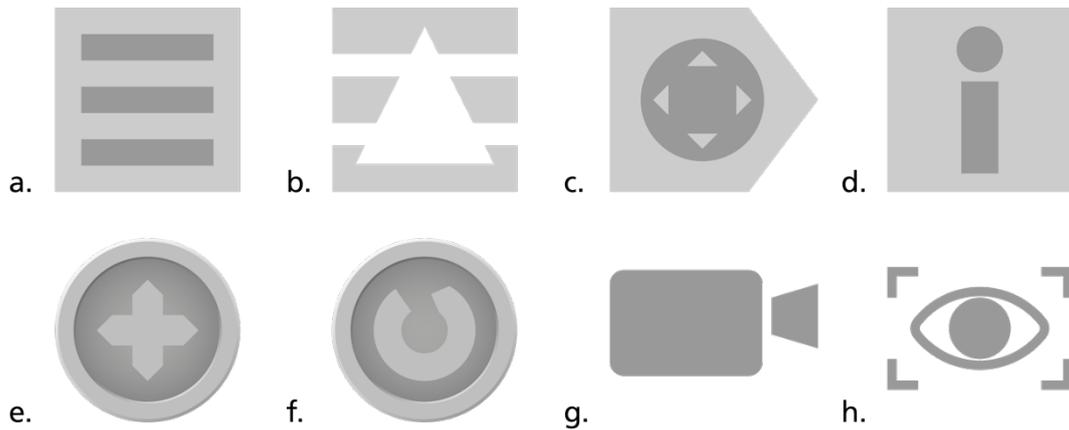
## **4.4. Interface**

Bei der Entwicklung des Interface ist zu beachten, dass für die verschiedenen Anwendungsplattformen unterschiedliche Interfaces benötigt werden. So unterscheidet sich das des Elbedome deutlich von der für das Tablet entwickelten Benutzungsoberfläche. Die Grundfunktionen beider Interfaces sind aber annähernd gleich aufgebaut.

### **4.4.1. Symbole und Menüs**

Für das Tablet finden unterschiedliche Icons Anwendung, wovon einige auch beim Interface des Elbedome genutzt werden. Für die folgenden Funktionen kommen Symbole zum Einsatz:

- Menüaufruf
- Menü schließen
- Navigation ein- und ausblenden
- Navigation: Bewegen
- Navigation: Kamera drehen
- Informationen aufrufen
- Ansichtspunkt



**Abb. 13:** Verwendete Icons

In Abb. 13 sind alle verwendeten Icons dargestellt. Das Symbol für den Menüaufruf ist aus unterschiedlichen Applikationen für Smartphones und Tablets (Abb. 13a) bekannt. Da das Menü von oben in das Sichtfeld des Nutzers eingeblendet wird, ist das Symbol für das Schließen des Menüs mit einem Pfeil nach oben versehen (Abb. 13b), was dem Nutzer verdeutlicht, dass das Menü beim Betätigen der Schaltfläche wieder nach oben gefahren wird. Das Icon zum Ein- und Ausblenden der Navigationselemente ähnelt in seiner Gestalt einem Kompass oder einem Steuerkreuz (Abb. 13c). So kann der Nutzer leicht erfassen, dass damit Funktionen zur Navigation aufgerufen werden können. Durch den pfeilartigen Hintergrund erschließt sich dem Nutzer instinktiv, wann das Icon zum Ein- und wann zum Ausblenden verwendet wird. Die Symbole zum Bewegen und Drehen der Kamera erschließen sich Nutzern mit Erfahrungen in 3D-Computeranwendungen (Abb. 13e und f). Durch das pfeilartige Kreuz und den rotierenden Pfeil erklären sich diese aber auch ungeübten Nutzer leicht. Das kleine „i“ für Informationen ist aus dem alltäglichen Umfeld bekannt. Das Symbol für einen Ansichtspunkt sollte ursprünglich durch ein Kamerasymbol dargestellt werden (Abb. 13g). Dies wird von Nutzern mit Erfahrung im Erstellen und Verwenden von 3D-Anwendungen auch direkt entsprechend korrekt interpretiert. Bei fachfremden Nutzern oder mit wenig Erfahrung wird das Icon unter Umständen falsch als Foto-Punkt interpretiert. Daher kommt als Symbol ein stilisiertes Auge zum Einsatz (Abb. 13h). Dies verdeutlicht besser die beabsichtigte Funktion.

### ***Interface Tablet***

Das Interface der Anwendung bei Nutzung auf dem Tablet orientiert sich an der gewohnten Einteilung und Bedienung von herkömmlichen Applikationen auf Smartphones und Tablets. So kann der Anwender auf eine gewohnte Nutzungserfahrung zurückgreifen, was das Erlernen und

den Gebrauch der Anwendung deutlich erleichtert. Da die Bildschirmgröße begrenzt ist, wird so viel Inhalt wie möglich dargestellt, ohne durch Bedienelemente eingeschränkt zu werden. So kommt in der Anwendung ein Off-Canvas-Menü zum Einsatz (Abb. 14). Dies bedeutet, das Menü ist nicht dauerhaft auf dem Bildschirm zu sehen, sondern wird nur bei Bedarf eingeblendet.

Alle Punkte sind mit eindeutigen Begriffen versehen, so kann Fehlbedienungen vorgebeugt werden. Es erleichtert ebenfalls die Erlernbarkeit der Anwendung und stellt eine intuitive Bedienung sicher. Die Schaltflächen des Menüs sind mit Responsefunktionen ausgestattet. Dadurch erhält der Nutzer ein Feedback, welche und ob die Taste gedrückt wurde. Dies wird durch eine unterschiedliche Farbgebung zwischen den beiden Zuständen erreicht.

Die Menüelemente sind in Graustufen angelegt. Dadurch hebt sich das Menü deutlich von der farbigen VR-Welt ab. Es ist semitransparent angelegt, um die Immersion des Nutzers nicht zu sehr zu unterbrechen. Gleiches gilt auch für die Navigationselemente.

Die einzelnen Menüpunkte sind gemäß ihrer voraussichtlichen Häufigkeit der Nutzung angeordnet. So sind oft verwendete Funktionen wie beispielsweise *Situationswechsel* oder *Farbe / Ton* oben positioniert. Funktionen wie *Einstellungen* hingegen befinden sich am Ende der Liste. Bezüglich der Ausrichtung des Menüs wird eine vertikale Anordnung gewählt. Diese kann bei Bedarf leichter um zusätzliche Funktionen erweitert werden.

An vordefinierten Punkten innerhalb der virtuellen Umgebung werden zusätzliche Informationen für den Nutzer bereitgestellt. Diese sind durch gut erkennbare Symbole gekennzeichnet. Bewegt sich ein Nutzer in der Nähe dieser Symbole, wird das Info-Icon (Abb. 13d) eingeblendet. Durch das Drücken dessen werden die Informationen, ähnlich wie auch beim Menü, eingeblendet und stehen dem Anwender zur Verfügung.



**Abb. 14:** Darstellung des Bedienmenüs auf dem Tablet –  
Auswahl der Farbeinstellung

### *Interface Elbedome*

Die Gestaltung des Interface für den Elbedome erfordert eine gänzlich andere Herangehensweise als für das Tablet. Da es sich um eine virtuelle Umgebung handelt, können die üblichen zweidimensionalen Ansätze, die von herkömmlichen Bildschirmanwendungen bekannt sind, nicht verwendet werden. Einige der Aspekte zweidimensionaler Menüs können aber auf den dreidimensionalen Raum adaptiert werden. Feinmotorische Bewegungen, wie sie am Bildschirm ausgeführt werden, sind in einer virtuellen Umgebung sehr schwer umzusetzen. Daher wird bei der Gestaltung des Interface des Elbedome auf eine möglichst grobmotorische Bedienbarkeit geachtet.

Der Raum in einer VR ist theoretisch unendlich. Der Nutzer sollte nicht von Menüpunkt zu Menüpunkt laufen müssen. Um den vorhandenen Raum gut zu nutzen, wurde eine kreisförmige Ausrichtung der Schaltflächen gewählt. Der Umkreis wurde dabei so gewählt, dass der Durchschnittsanwender alle Schaltflächen mit der Reichweite seiner Arme bequem berühren kann, ohne sich zu strecken.

Der Nutzer sieht beim Aufruf des Menüs die untere Reihe der Schalttafeln. Durch Drücken (wie in Kap. 4.4.3 beschrieben) des Buttons gelangt der Nutzer auf die nächste Menüebene oder führt die gewünschte Funktion aus. Abb. 15 zeigt die zweite Ebene bei der Auswahl der Darstellungsebene. Die Ebenen entsprechen der in Kap. 4.4.2 beschriebenen Menüstruktur.

Die Darstellung der virtuellen Umgebung im Elbedome ist sehr hochwertig. Trotzdem ist die Farbdarstellung im Vergleich zur Realität hinsichtlich Sättigung, Brillanz und Kontrast eindeutig schwächer. Aus diesem Grund werden alle Objekte, die der Szene zusätzlich zum Realitätsabbild hinzugefügt werden, mit möglichst kontrastreichen Farben versehen. So wird sichergestellt, dass sich die Objekte (Menütasten, Infotafeln, etc.) gut von der Umgebung abheben. Die Farbwahl der in Abb. 15 dargestellten Menüpunkte ist dem Corporate Design des Kooperationspartners Fraunhofer IFF angepasst und entspricht etwa dem Farbton Pantone 334c.

Ähnlich wie bei der Tablet-Variante gibt es auch im Elbedome Infopunkte. Durch das Berühren dieses Objekts baut sich rechts relativ zum Nutzer eine virtuelle Infotafel auf, auf welcher die zusätzlichen Informationen dargestellt werden. Die Bedienung der Infotafel erfolgt dabei ähnlich eines großen Touchscreens.



**Abb. 15:** Darstellung des Bedienmenüs im Elbedome –  
Auswahl der Darstellungsebene

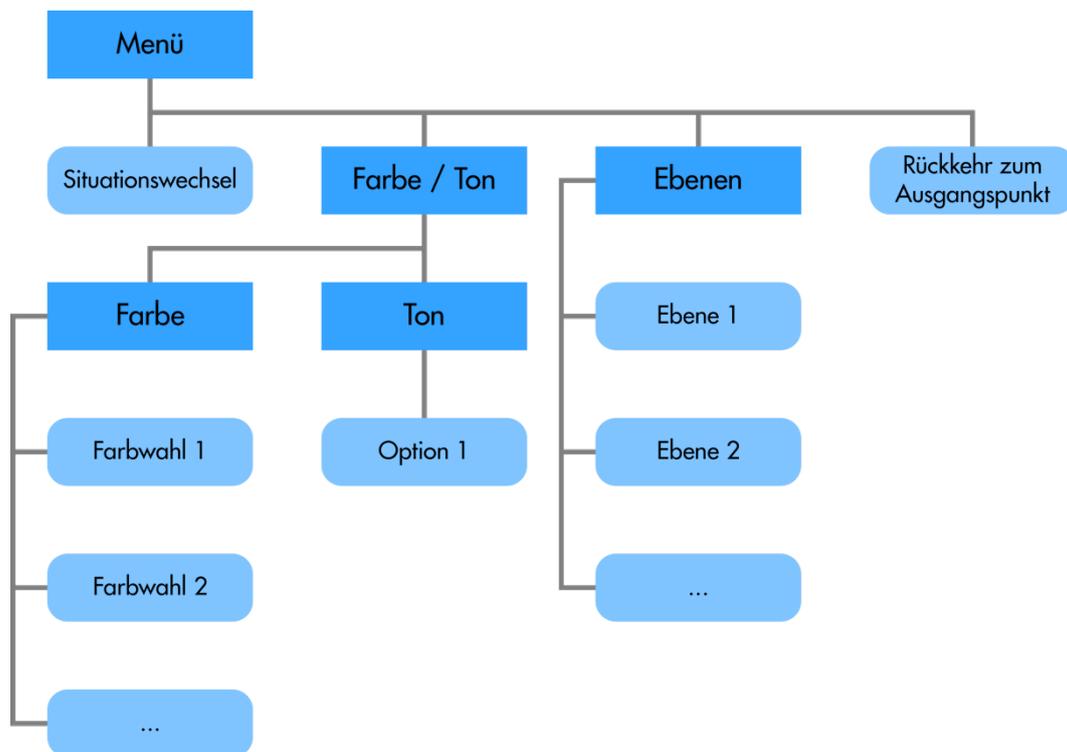
### 4.4.2. Menüstruktur

Um die Anwendung während der Nutzung zu bedienen, werden bestimmte Steuerungselemente in einem Menü dargestellt. Die Struktur des Menüs der Anwendung ist für beide Verwendungen, sowohl im Elbedome als auch auf dem Tablet, beinahe gleich. Sie ist bewusst klein und übersichtlich angelegt, um die Erlernbarkeit und Verwendung möglichst einfach zu gestalten.

Die Struktur wird in zwei unterschiedliche Level unterteilt, das Nutzer- und das Administratorlevel.

### ***Nutzerlevel***

Das Nutzerlevel verfügt über folgende Punkte: *Situationswechsel*, *Farbe / Ton*, *Darstellungsebene*, *Ausgangspunkt* (Abb. 16).



**Abb. 16:** Menüstruktur auf Nutzerlevel

Die Anwendung ist in der Lage, unterschiedliche Situationen darzustellen, beispielsweise die Sperrung einer Straße für den LKW-Verkehr. Durch eine solche Sperrung wird der Schalldruckpegel signifikant reduziert, da nicht nur die Anzahl der Emissionsquellen reduziert wird, sondern auch die wesentlich lautereren Schallquellen, die LKW, wegfallen. Der Nutzer kann mit dem Punkt *Situationswechsel* zwischen den beiden Konstellationen, beispielsweise mit und ohne LKW, wechseln und sich damit die Auswirkung auf die Schallemissionen in beiden Zuständen anzeigen lassen.

Unter dem Menüpunkt *Farbe / Ton* wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Anzeigemodi für die Schallemissionen einzustellen. Im Unterpunkt „Farbe“ kann gewählt werden, ob die Emissionen in einem Farbverlauf von Rot über Gelb nach Grün dargestellt werden. Die Farbgebung ist dabei abhängig von der Lautstärke der Schallquellen, wobei die Lautstärke-

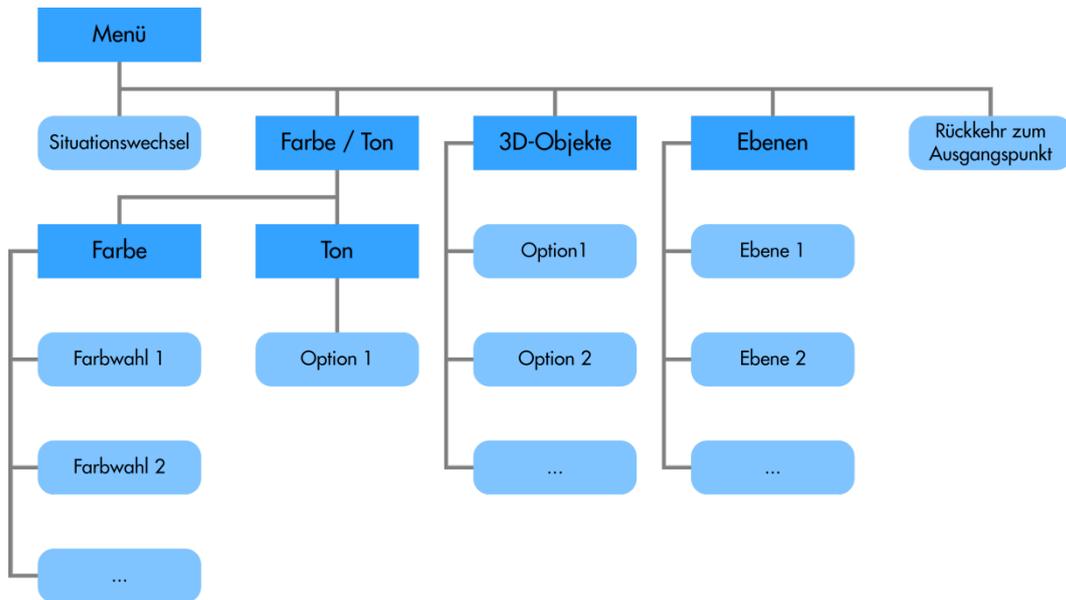
pegel von Rot nach Grün abnimmt. Die Einstellung *Magenta* ist für Nutzer gedacht die von einer Farbfehlsichtigkeit betroffen sind. Hierbei wird der Lautstärkepegel der Schallquellen kontinuierlich auf eine Farbskala abgebildet, die über nur einen Farbton verfügt. Die Sättigung des Farbtons stellt den Verlauf des Pegels dar, wobei das Maximum der Sättigung dem lautesten Pegel entspricht. So wird sichergestellt, dass Menschen mit dieser Beeinträchtigung auch visuell die Auswirkungen der Schallemissionen wahrnehmen. Die Farbdarstellung kann aber auch gänzlich ausgeschaltet werden. Dadurch wird eine realistischere Darstellung erreicht und die Immersion des Nutzers erhöht.

Die Anwendung ist so konzipiert, dass unterschiedliche Betrachtungsebenen dargestellt werden können. Diese Ebenen kann der Nutzer unter dem Punkt *Darstellungsebene* einstellen. Die Wahlmöglichkeiten sind *Regionalebene*, *Standortebene* und *Objektebene*.

Da sich ein Nutzer in der virtuellen Welt frei bewegen kann, besteht theoretisch die Möglichkeit, dass sich ein Nutzer, beispielsweise durch eine versehentliche Fehlbedienung der Navigationselemente auf dem Tablet, „verläuft“. In diesem speziellen Fall kann über den Menüpunkt *Ausgangspunkt* eine Repositionierung des Nutzers erfolgen. Er wird an die Koordinaten, die als Ursprung des Szenarios festgelegt sind, „teleportiert“ und kann von dort aus die Navigation innerhalb der VR neu beginnen. Die Gefahr, sich in der virtuellen Umgebung des Elbedomes zu „verlaufen“, wird aufgrund des unterschiedlichen Bedienkonzepts als sehr gering eingeschätzt. Daher wird ein dauerhaft eingeblendetes Bedienelement, welches den Nutzer zum Ausgangspunkt zurückführt, als nicht notwendig betrachtet. Ein Menüpunkt mit dieser Funktion ist aber sinnvoll, um es dem Nutzer zu erleichtern, ohne Umwege in die Ausgangsposition zurückzukehren.

### ***Administratorlevel***

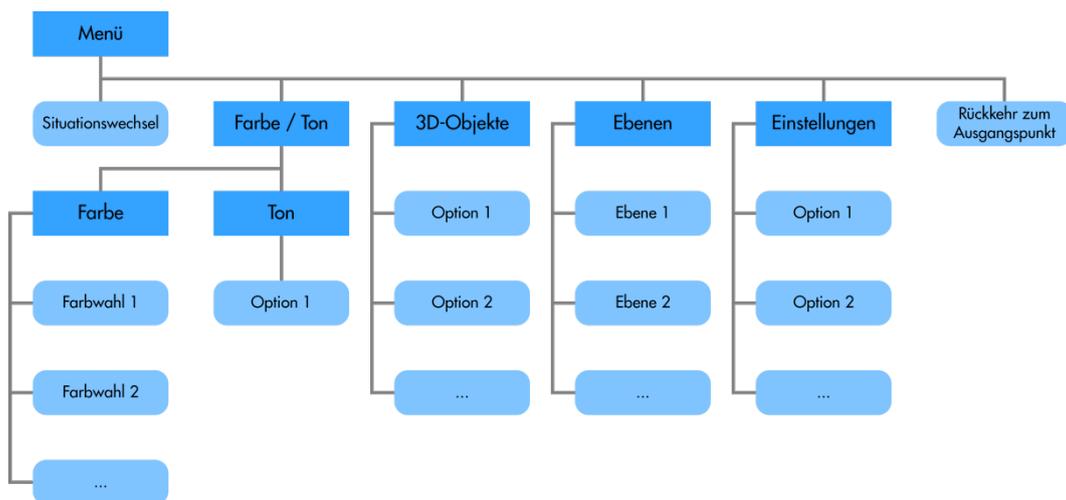
Das übergeordnete Level, das Administratorlevel, enthält neben den Funktionen des Nutzerlevels zusätzlich den Punkt *3D-Objekte*. Dies gibt dem Administrator die Möglichkeit, spezielle Parameter der Schallemissionen während der Nutzung der Anwendung zu modifizieren (Abb. 17). In der hier entwickelten Ausbaustufe der Anwendung kann die Anzahl der PKW und LKW eingestellt werden. Letzteres hat einen direkten Effekt auf die Schallemissionen. Unter dem Punkt *Weitere* können andere Objekte manipuliert werden, wie zum Beispiel die Dichte einer Hecke, welche als Schallschutz dienen soll. Diese Einstellmöglichkeiten können aber im Zuge der Weiterentwicklung der Anwendung noch ausgebaut und erweitert werden.



**Abb. 17:** Menüstruktur auf Administratorlevel

**Zusatzfunktion Tablet**

Auf dem Tablet wird ein zusätzlicher Menüpunkt *Einstellungen* angeboten (Abb. 18). Dieser ermöglicht dem Nutzer, die Bedienelemente an seine persönlichen Bedürfnisse anzupassen. Das Icon für den Menüaufruf kann in den Einstellungen personalisiert positioniert werden, also in jede der vier Ecken des Sichtfeldes platziert werden. Somit kann jeder Nutzer die Position festlegen, welche er für sich als am wenigsten störend empfindet. Es besteht auch die Möglichkeit, sich zwischen unterschiedlichen Navigationsmodi zu entscheiden. Die Sprache des Menüs ist ebenfalls anpassbar.



**Abb. 18:** Menüstruktur auf dem Tablet

Allgemein sind alle Menüpunkte situationspezifisch anpassbar und können bei Bedarf auch noch um weitere Punkte ergänzt werden.

### **4.4.3. Navigation im Elbedome**

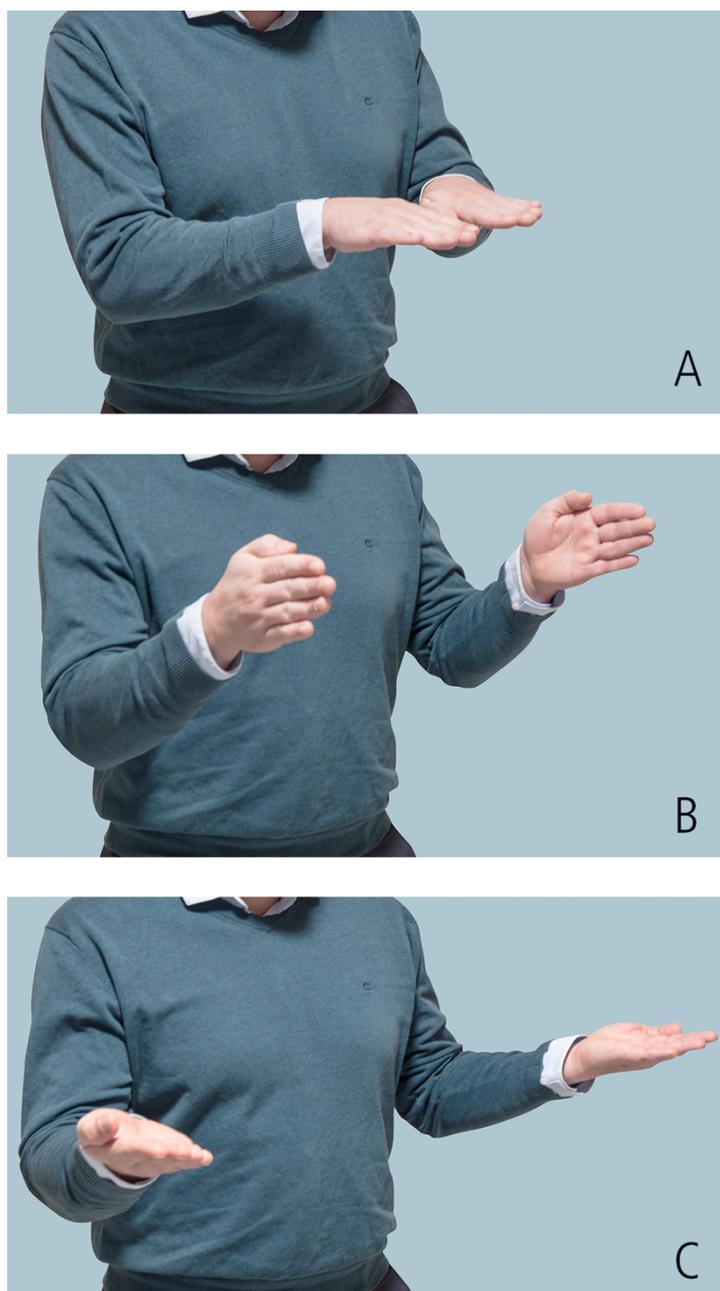
Die Navigation und Bedienung innerhalb des Elbedome erfolgt sowohl über Gestensteuerung als auch über ein einblendbares Menü. Während der Nutzung der Anwendung ist das Menü nicht sichtbar. Dies erhöht die Immersion des Nutzers.

Der Aufruf des Menüs erfolgt über eine Geste (Abb. 19). Der Nutzer streckt beide Arme aus, die Hände sind offen und dicht beieinander. Die Handinnenflächen zeigen zum Boden. Der Nutzer öffnet die Arme in einem Bogen und dabei dreht er die Hände um 180°, so dass die Handinnenflächen nach oben zeigen. Die Geste ähnelt dem Aufschlagen eines Buches. Auf diese Art werden die Menüpunkte eingeblendet. Diese bleiben aktiv und sichtbar bis eine Geste zum Schließen des Menüs erfolgt.

Um das Menü zu schließen, hält der Nutzer beide Arme offen vor sich gestreckt. Die Handinnenflächen weisen nach oben. Die Hände werden wieder um 180° gedreht und die Arme in einem Bogen zusammengeführt. Die Hände befinden sich nun wieder in der Ausgangsposition, wie bei der Geste zum Öffnen des Menüs.

Zur Auswahl eines Menüpunktes fährt der Nutzer mit ausgestrecktem Zeigefinger über die „Schalttafeln“ des Menüs. Sobald die virtuelle Hand über den Menüpunkt fährt, ändert dieser seine Farbgebung. Durch eine Drückbewegung, das heißt durch ein Vor- und Zurückbewegen des ausgestreckten Zeigefingers, wird der Menüpunkt aktiviert.

Auf dem Administratorlevel hat der Nutzer die Möglichkeit, unterschiedliche Schieberegler zu bedienen. Die erfolgt über eine Geste des Greifens und Schiebens. Der Nutzer fährt mit geöffneter Hand über den Regler. Berührt die Hand den Regler, schließt der Nutzer die Hand zur Faust und „schiebt“ diesen in die gewünschte Richtung. Das Öffnen der Faust beendet den Vorgang.

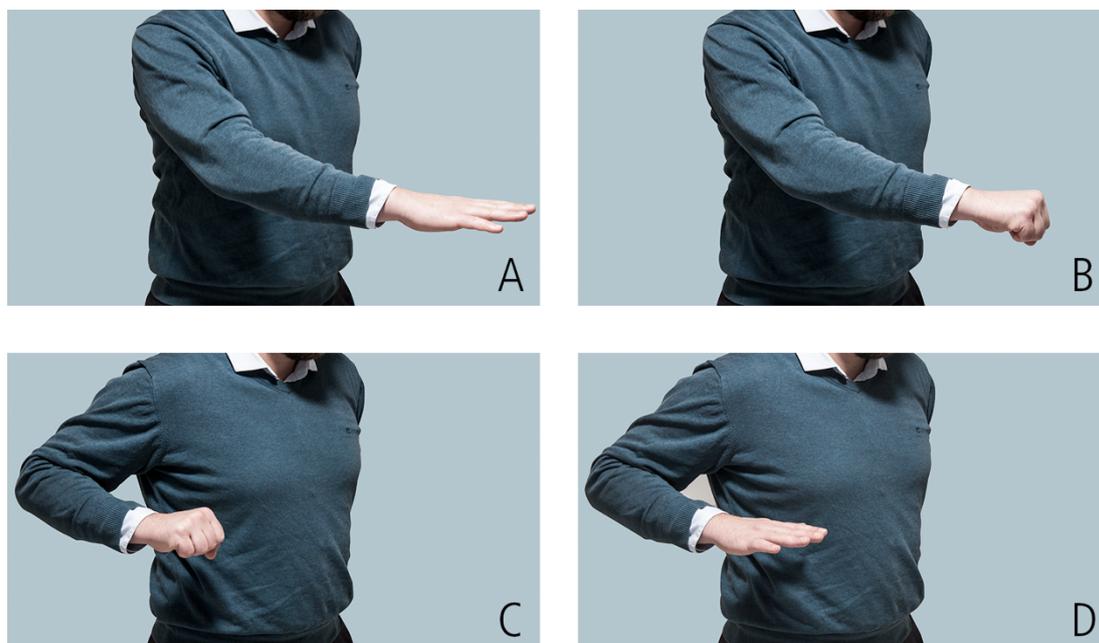


**Abb. 19:** Gestensteuerung zu Öffnen/Schließen des Menüs

Die Gesten für die Bewegung des Nutzers entsprechen der natürlichen Geste des Heranziehens beziehungsweise Wegschiebens eines Punktes oder Gegenstandes in der realen Welt (Abb. 20). In der virtuellen Umgebung bewegt sich der Nutzer vorwärts, in dem er einen Arm mit geöffneter Hand ausstreckt. Die Handinnenfläche zeigt dabei zum Boden. Dann schließt er die Hand zur Faust und zieht seinen Arm zurück in Richtung seines Körpers. Dies setzt die Vorwärtsbewegung in Gang. Diese wird so lange fortgeführt, bis der Nutzer die Faust wieder öffnet. Für eine Rückwärtsbewegung ist der Handlungsablauf wie folgt: der Nutzer hält die offene Hand neben seinem Körper, wobei die Handinnenfläche zu Boden gerichtet ist. Das Schließen

der Hand zu einer Faust und anschließende Bewegungen nach vorn startet die Rückwärtsbewegung. Durch das Öffnen der Faust wird der Bewegungsvorgang wieder beendet.

Die Richtung, in welche sich der Nutzer bewegt, wird durch die Blickrichtung gesteuert, welche vom VR-System dauerhaft erfasst wird. Das heißt, der Nutzer bewegt sich immer dorthin, wohin er gerade schaut.



**Abb. 20:** Gestensteuerung Bewegung

Eine mögliche Alternative zur Blickrichtung wäre es, den gleichen Bewegungsablauf wie für das Vor- und Zurückbewegen anzuwenden, nur mit dem Unterschied, dass der Nutzer den Arm nicht vor- und zurückbewegt, sondern seitwärts, also von links nach rechts für eine Drehung nach links und umgekehrt. Da sich der Nutzer jedoch innerhalb des Elbedome frei bewegen, sich um seine eigene Achse drehen und innerhalb eines gewissen Radius auch laufen kann, wird eine solche Funktion zum Drehen der Kamera als nicht sinnvoll erachtet und entfällt somit.

Um zusätzliche Informationen anzuzeigen, werden an ausgewählten Punkten innerhalb der virtuellen Umgebung spezielle Icons platziert (Abb. 21). Durch das Drücken dieser Icons erscheint eine Infotafel, auf welcher die Informationen dargestellt werden. So wird dem Nutzer Gelegenheit gegeben, sich Auskünfte und Hinweise zur aktuellen Szene anzeigen zu lassen.



**Abb. 21:** Darstellung eines Informationspunktes innerhalb der VR des Elbedome

#### **4.4.4. Navigation auf dem Tablet**

Bei der Nutzung der Tablet-Variante kann der User über zuvor festgelegte Ansichtspunkte innerhalb der virtuellen Umgebung navigieren. Der Nutzer kann diese farblich markierten Punkte auswählen, um seine Position auf diesen Standort zu verschieben (Abb. 22). Die Darstellung solcher Ansichtspunkte erfolgt über eine farbliche Markierung und ein Kamerasymbol, welches über dem Punkt schwebt und rotiert.



**Abb. 22:** Darstellung eines Navigations- und Ansichtspunktes innerhalb der VR auf dem Tablet

Die Drehung der Kamera beziehungsweise die Änderung der Blickrichtung erfolgt dabei durch die physische Drehung des Nutzers mit dem Tablet. Dies wird durch den Zugriff auf den integrierten Gyroskop-Sensor ermöglicht. Die Szene kann ebenfalls gedreht werden, indem mit zwei Fingern über den Bildschirm gestrichen wird. Das Wischen von rechts nach links führt eine Drehung der Kamera nach rechts aus und umgekehrt erfolgt eine Drehung nach links. Alternativ kann der Nutzer durch Drücken des Navigationsicons einen virtuellen Joystick einblenden (Abb. 23). Dies ermöglicht eine Navigation, die der Nutzung eines realen Joysticks, wie beispielsweise des Playstation Dualshock Controllers von Sony, entspricht. Dadurch lassen sich translatorische Bewegungen des Nutzers durchführen und ermöglichen eine Bewegung innerhalb der virtuellen Umgebung. Durch Nutzung einer Pinch-Funktion wird ein Hinein- und Herauszoomen ermöglicht, welche dem Nutzer ebenfalls durch die Nutzung von Smartphones oder Tablets bekannt ist.



**Abb. 23:** Darstellung der alternativen Navigationsoption –

**A:** Menüaufruf, **B:** Schließen des Navigationstools,

**C:** Bewegen innerhalb der VR, **D:** Drehen der Kamera innerhalb der VR

Lediglich das Icon zum Menüaufruf ist dauerhaft dargestellt. Durch eine Berührung des Icons wird das Menü ein- und ausgeblendet. Durch die uneingeschränkte Sicht des Nutzers auf die gesamte Szenerie wird eine höhere Immersion des Nutzers erlangt. Die dauerhafte Einblendung von Befehlsleisten, Auswahloptionen oder ähnlichem würde dies deutlich verringern.

Die in dem vorangegangenen Kapitel beschriebenen Interface- und Navigationskonzepte zeigen in den Abbildungen die Objektebene. Die Funktionalität umfasst jedoch alle Darstellungsebenen und versetzt den Nutzer in die Lage, die Applikation in unterschiedlichen Szenarien anzuwenden.

## 4.5. Beispielszenarien

Um eine Vorstellung zu erhalten, wie die Anwendung den Nutzer dabei unterstützt, die Auswirkungen von Schallemissionen zu erfassen, werden im Folgenden einige mögliche Szenarien beispielhaft beschrieben.

### ***Regionalebene***

Die Regionalebene ermöglicht es, großflächige Gebiete und die damit verbundenen Auswirkungen von Schallemissionen zu betrachten. Als Beispiel kann dafür der Neu- oder Ausbau einer Autobahn gesehen werden. Wird in einer Region eine Autobahn gebaut, ändert sich damit auch die Lärmsituation für die umliegenden Ortschaften. Je nach Entfernung der Ortschaft zur Autobahn reduziert beziehungsweise steigt der Lärmpegel. In der Ausgangssituation erfolgt eine Darstellung der Region gemäß aktueller Lärmkarten. Diese stellen die Lärmverteilung in den Ortschaften und den angrenzenden Gebieten dar. Die Werte über das Verkehrsaufkommen und die Zusammensetzung werden in der Vorbereitungsphase in die Anwendung eingepflegt. Erfolgt nun der Neubau einer Autobahn, ändert sich die Verkehrsverteilung. Diese voraussichtliche neue Verteilung lässt sich mittels statistischer Methoden ermitteln. Die neuen Werte über das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsflüsse werden in die Zielsituation eingearbeitet. Voraussichtlich reduziert sich der LKW-Verkehr auf den Bundes- und Landstraßen und verlagert sich auf die Autobahn. Zusätzlich werden Autobahnen meist durch Lärmschutzwände begrenzt. Dadurch wird der Lärmpegel innerhalb der Ortschaften möglicherweise verringert. Der Nutzer hat nun die Möglichkeit, sich beide Situationen anzusehen und zu vergleichen.

### ***Standortebene***

Auf der nächstniedrigeren Ebene, der Standortebene, wäre ein Fabrikneubau oder das Errichten eines Industrieparks am Rande einer Stadt ein vorstellbares Szenario. In der Ausgangssituation wird eine Stadt oder ein Stadtteil dargestellt. Es werden farbliche Texturen gemäß der aktuellen Lärmentwicklung, wie sie Lärmkarten abbilden, auf die Umgebung projiziert. Das Verkehrsaufkommen, welches statistisch erfasst ist, wird simuliert und die aktuellen Schallemissionen werden visualisiert. Dies bildet die aktuelle Ausgangssituation in der realen Welt nach. Wird nun ein Industriepark oder eine Fabrik gebaut, ändern sich demnach auch die Schallemissionen. Die Fabriken oder Produktionsstätten erzeugen aufgrund ihrer Maschinen und Anlagen Lärm und auch das Verkehrsaufkommen, speziell im Bereich der LKW ändert sich durch das An- und Abfahren von Zulieferern. Werden diese Werte in die Simulation mit eingepflegt, wird dem Nutzer ermöglicht, die Auswirkungen auf die Geräusentwicklung im Umfeld des Neubaus zu betrachten. Der Neubau einer Umgehungsstraße um eine Ortschaft kann als weiteres Beispiel für die Standortebene dienen. Vielerorts ist ein hohes Verkehrsaufkommen, speziell im LKW-Segment gegeben. Dies belastet sowohl die Anwohner als auch die Umwelt. Das häufige Bremsen und Anfahren an Kreuzungen und Ampeln innerorts erhöht den ohnehin schon hohen Lärmpegel, der von LKW erzeugt wird, noch zusätzlich. Die Verlagerung des LKW- und Pendlerverkehrs auf eine Umgehungsstraße würde den Lärmpegel in Ortschaften signifikant senken.

Die Auswirkungen eines solchen Neubaus können sehr gut auf der Standortebene dargestellt werden.

### **Objektebene**

Die Ebene mit der höchsten Immersion des Nutzers und der detailliertesten Darstellung ist die Objektebene. Ein Beispiel für die Nutzung dieser Ebene ist das folgende Szenario: Ein Wohngebiet wird für den LKW-Verkehr gesperrt und die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h reduziert, um die Lärmbelastung zu verringern.

Ein LKW verursacht bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h etwa einen Schalldruckpegel von 80-85 dB(A), ein PKW bei gleicher Geschwindigkeit etwa 65-70 dB(A). Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h erzeugt ein PKW nur noch etwa einen Pegel von 58-62 dB(A). Die genauen Werte variieren in der Literatur. Da die Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB einer subjektiven Verdopplung der Lautstärke entspricht (siehe 2.4.1), wird deutlich, welche Auswirkungen die genannten Maßnahmen auf die Schallemissionen in dem Wohngebiet haben. Die Unterschiede hängen natürlich noch von weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise der Straßenbeschaffenheit oder der Anzahl der Fahrzeuge. Allerdings schmälert dies die Signifikanz des Unterschieds nur wenig. Werden beide Situationen nun in der virtuellen Umgebung der Anwendung dargestellt, kann dem Nutzer sehr gut gezeigt werden, welche Auswirkungen die Maßnahmen auf sein Umfeld haben. Ähnliche Resultate können beispielsweise auch bei einem für den Kraftverkehr gesperrten Innenstadtbereich mit Umstellung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) auf umweltschonenden Elektroantrieb deutlich gemacht werden. Auf diese Art lassen sich Konzepte der Verkehrsvermeidung als Mittel zum Lärmschutz gut präsentieren.

Ein vorstellbares Szenario ist auch die aktuelle Situation des Tunnelbaus am Damaschkeplatz in Magdeburg. Nach Fertigstellung der Baustelle werden die Kraftfahrzeuge durch einen Tunnel am besagten Gebiet vorbeigeleitet. Lediglich der ÖPNV fährt oberirdisch. Durch die Verlagerung des Verkehrs unter die Erde werden die eigentlich erzeugten Schallemissionen der Fahrzeuge eliminiert. Durch die Nutzung der Anwendung wird dem User die Gelegenheit geboten, einen Eindruck der zukünftigen Verhältnisse in Bezug auf die Lärmbelästigung in dem Gebiet zu bekommen.

Die zuvor genannten Szenarien zeigen nur einige ausgewählte Beispiele für die Einsatzmöglichkeiten der Anwendung. Diese können noch vielgestaltig erweitert werden.

## **4.6. Zusammenfassung**

Im Verlauf der Konzeptionierung wurde die Aufgabenstellung weiter präzisiert und Anforderungen an die Anwendung definiert. Die notwendigen Daten und Parameter wurden festgelegt und eine Lösung für die Aufgabenstellung daraus hergeleitet. Dabei wurde der Grundaufbau des VR-Systems und der Systemarchitektur kurz erläutert. Die Verarbeitungslogik wurde entwickelt, mit welcher die Darstellung von Schallemissionen sowohl optisch als auch akustisch erfolgen kann. Dafür wurden die benötigten Visualisierungstechniken ausgewählt und beschrieben. Ein Interface für die Anwendung wurde erarbeitet, passende Grafiken designt und die Menüstruktur festgelegt. Konzepte zur Navigation wurden gleichermaßen für den Elbedome wie auch für die Verwendung auf dem Tablet gestaltet. Abschließend wurden Szenarien beschrieben, die beispielhaft die Einsatzmöglichkeiten der Anwendung zeigen. Somit erfolgt im nächsten Schritt der Beginn der Realisierung beziehungsweise die Umsetzung des theoretischen Konzepts in eine praktisch nutzbare Anwendung.

## 5. Prototyp

Nachdem die theoretische Ausarbeitung des Konzepts zur Visualisierung von Schallemissionen erfolgt ist, wird die Anwendung prototypisch implementiert. Dabei werden ausgewählte Funktionen in der Praxis umgesetzt.

Dem Prototyp wird dabei das Akronym OpAk-Vis als Name zugewiesen. Dies steht für „optisch-akustisches Visualisierungstool“. Die Vorgehensweise bei der Implementierung wird im Folgenden näher erläutert.

### 5.1. Implementierung

Wie bereits in Kap. 4.3.2 beschrieben werden zu Beginn alle relevanten Daten (3D-Geometrien, Materialien, Texturen, Audiodaten, etc.) in Unity3D importiert. Zum Aufbau der Szene werden die Geometrien per Drag and Drop in die Szene gezogen. Exakte Positionsdaten können über das Positionsmenü eingegeben werden. Nachdem alle Game Objects korrekt platziert wurden, werden diese mit entsprechenden Skripten verknüpft.

Als erste Funktion des Prototyps wird die Pegeladdition implementiert. Sind mehrere Schallquellen in der Szene aktiv, addieren sich ihre Schalldruckpegel zu einem Gesamtpegel welcher vom Audiosystem wiedergegeben wird.

Jedes Objekt in der Szene, das als Schallquelle fungiert, verfügt über bestimmte Eigenschaften. Diese definieren, ob das Objekt beispielsweise vom Typ LKW oder PKW ist oder welchen Schalldruckpegel es emittiert. Die Eigenschaften der Objekte sind in einer \*.json-Datei hinterlegt. Um die Objekte darzustellen, müssen verschiedene Klassen erzeugt und entsprechende Skripte für das Verhalten geschrieben werden.

Das Skript *ScenarioManager* (Abb. 24) liest die \*.json-Datei aus. Es erstellt aus allen in der Datei hinterlegten Audioquellen Objekte der Klasse `VehicleConfig` und erzeugt eine Liste `<VehicleConfig>` mit allen in der Szene zu platzierenden Soundquellen. Dies erfolgt mit Hilfe des Skripts *ScenarioConfig*, welches Abb. 25 zeigt.

```
[System.Serializable]
public struct VehicleScenarioConfig
{
    public VehicleType vehicleType;
    public AudioClip sound;
    public GameObject vehiclePrefab;
}

public class ScenarioManager : MonoBehaviour
{
    public string scenarioConfigFilename = "scenarioConfig.json";
    public List<VehicleScenarioConfig> vehicleScenarioConfigs = new
List<VehicleScenarioConfig>();

    public ScenarioConfig ScenarioConfig { get; private set; }

    public VehicleScenarioConfig GetVehicleScenarioConfig(VehicleType type) =>
vehicleScenarioConfigs.First(v => v.vehicleType == type);

    // Start is called before the first frame update
    void Start()
    {
        var scenarioConfigJson = File.ReadAllText(scenarioConfigFilename);
        ScenarioConfig = JsonConvert.DeserializeObject<ScenarioConfig>(scenarioConfigJson);
        var summenpegel = PhysicalCalculations.BerechneSummenpegel(ScenarioConfig.vehicles);
        Debug.Log($"Summenpegel: {summenpegel}");

        foreach (var vehicleConfig in ScenarioConfig.vehicles)
        {
            var config = GetVehicleScenarioConfig(vehicleConfig.type);
            var vehicle = Instantiate(config.vehiclePrefab, transform);
            var controller = vehicle.AddComponent<VehicleController>();
            controller.scenarioManager = this;
            controller.vehicleConfig = vehicleConfig;
        }
    }
}
```

**Abb. 24:** Code – ScenarioManager

Daraufhin wird der Gesamtpegel aller Audioquellen der Liste berechnet. In einer Schleife wird jedes Objekt der Liste `<VehicleConfig>` instanziiert und in der Szene platziert. Zusätzlich wird jedem Objekt noch die Komponente `VehicleController` hinzugefügt.

```

public enum VehicleType
{
    PKW,
    LKW,
    E_PKW
}

[System.Serializable]
public class VehicleConfig
{
    [JsonConverter(typeof(StringEnumConverter))]
    public VehicleType type;
    public float sdp = 80;
    public float velocity = 50;
}

[System.Serializable]
public class ScenarioConfig
{
    public List<VehicleConfig> vehicles = new List<VehicleConfig>();
}

```

**Abb. 25:** Code – ScenarioConfig

```

[RequireComponent(typeof(AudioSource))]
public class VehicleController : MonoBehaviour
{
    public VehicleConfig vehicleConfig;
    public ScenarioManager scenarioManager;

    private AudioSource _audioSource;

    // Start is called before the first frame update
    void Start()
    {
        _audioSource = GetComponent<AudioSource>();
        _audioSource.volume = PhysicalCalculations.CalculateVolumeFromSDP(vehicleConfig.sdp);
        _audioSource.clip =
scenarioManager.GetVehicleScenarioConfig(vehicleConfig.type).sound;
        _audioSource.loop = true;
        _audioSource.Play();
    }

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {
    }
}

```

**Abb. 26:** Code – VehicleController

Das Skript *VehicleController* legt ausgewählte Darstellungseigenschaften der platzierten Objekte fest (Abb. 26). Es ruft die Komponente Audioquelle der Instanz ab und berechnet auf Basis des hinterlegten Schalldruckpegels die darzustellende Lautstärke. Im Anschluss wählt es die dem Typ entsprechende Tondatei aus und spielt diese in einer Schleife ab. Mit Hilfe diese Skripts wird im Zuge der weiteren Entwicklung auch die Entfernungsabhängigkeit der Lautstärke von der Position des Nutzers berechnet.

```
public class PhysicalCalculations
{
    public static float BerechneSummenpegel(IReadOnlyList<VehicleConfig> vehicles)
    {
        float summe = 0;
        float exp = 0;

        for (int i = 0; i < vehicles.Count; i++)
        {
            exp = vehicles[i].sdp/10;
            summe = summe + Mathf.Pow(10,exp);
        }

        var summenpegel = 10*Mathf.Log10(summe);
        return summenpegel;
    }

    public static float CalculateVolumeFromSDP(float sdp)
    {
        return sdp / 10f;
    }
}
```

**Abb. 27:** Code – PhysicalCalculation

Die Klasse `PhysicalCalculation` basiert auf der in Kap. 2.4.2 bereits erwähnten Gl. (3) und addiert die Schalldruckpegel aller in der Szene dargestellten Objekte (Abb. 27). Dazu wird die zuvor genannte Liste `<VehicleConfig>` ausgelesen und entsprechend der Anzahl der Objekte der Gesamtpegel berechnet.

## 5.2. Aufgetretene Probleme

Die Darstellung von Schallemissionen bedarf nicht nur realistisch klingender Audiodateien, auch der erzeugte Schalldruckpegel muss der Wirklichkeit entsprechen. Ein zu leise abgespielter Ton erzeugt ein falsches Abbild in der virtuellen Umgebung. Im Verlauf der Implementie-

rung zeigt sich, dass eine naturgetreue Wiedergabe von Soundfiles im Hinblick auf den Schalldruckpegel nicht einfach zu realisieren ist. Die Einstellung der Lautstärke (engl. *Volume*) in Unity3D liegt auf einer Skala von 0 – 1, wobei 1 der höchste beziehungsweise lauteste Wert ist.

Um die korrekte Einstellung respektive den Skalierungsfaktor zu ermitteln, ist es erforderlich, exakte Messungen im Elbedome und auch bei den möglicherweise verwendeten Kopfhörern des Tablets durchzuführen. So kann festgestellt werden, welches Level mit dem angestrebten Schalldruckpegel (beispielsweise 80 dB(A)) übereinstimmt. Das ist notwendig, um eine realistische Darstellung der Schallemissionen zu erreichen.

### **5.3. Zusammenfassung**

In den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels wurde gezeigt, wie als erster Vorgang die Funktion der Pegeladdition implementiert wurde. Sie ermöglicht die Darstellung von mehreren Schallquellen, in dem sie die Schalldruckpegel der Objekte in der Szene summiert. Es wurden die entsprechenden Klassen definiert und eine Berechnungsfunktion erarbeitet. Probleme bei der Implementierung wurden erörtert und entsprechende Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Der in dieser Arbeit gezeigt Prototyp stellt jedoch nur einen ersten Schritt in Richtung Realisierung der Anwendung dar. Andere Funktionen wie beispielsweise die Ab- oder Zunahme des Schalldruckpegels in Relation zum Abstand des Beobachters und einige weitere sind in zukünftigen Arbeitsschritten zu entwickeln.

## 6. Fazit und Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Visualisierung von Schallemissionen entwickelt, welches es ermöglicht diese Emissionen sowohl optisch als auch akustisch darzustellen und Lärm sowie dessen Auswirkungen abzubilden. Dieses Konzept wurde prototypisch implementiert. Abschließend wird nun ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten gegeben.

### 6.1. Fazit

Ziel der Arbeit war es, eine Anwendung zu konzeptionieren, welche es ermöglicht, Parameter von Schallemissionen in einer virtuellen Umgebung zu visualisieren. Gleichzeitig soll die Anwendung als Präsentations- und Kommunikationsplattform dienen. Dazu wurden gängige Praktiken analysiert und hinterfragt, entsprechende Anforderungen definiert und die relevanten Parameter erarbeitet. Das daraus entwickelte Lösungskonzept lässt den Nutzer Schallemissionen und deren Auswirkungen in einer VR-Umgebung erleben.

Durch die unterschiedlichen Darstellungsebenen wird der Nutzer in die Lage versetzt, aktuelle oder zu erwartende Auswirkungen von Schallemissionen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten und damit gegebenenfalls neue Erkenntnisse daraus zu ziehen. Die optische Darstellung von Schall in dem genutzten Farbkonzept vereinfacht die Verständlichkeit der Visualisierung. In Kombination mit der akustischen Präsentation der Lärmemissionen, die bei der Erarbeitung des Konzepts entstanden ist, verbessert sich die Wahrnehmung und Betrachtungsweise des Nutzers besonders im Hinblick auf die Interpretation von Daten zu Schallemissionen durch Nichtfachleute.

Um die Anwendung nutzen zu können, wurde ein entsprechendes Interface entwickelt. Dabei wurde sowohl auf vorhandene Bedienkonzepte zurückgegriffen als auch neue Ansätze geschaffen. Es wurden Symbole und Menüs gestaltet, die dem Nutzer eine gute Erlernbarkeit ebenso wie eine einfache Bedienung ermöglicht. Während bei dem Navigationskonzept für das Tablet zum Teil bestehende Vorgehensweisen genutzt wurden, kam bei der Navigation im Elbedome eine selbst entwickelte Methodik zum Einsatz. Beide Varianten bieten dem Nutzer jedoch eine intuitive Bedienbarkeit.

Die im Verlauf der Arbeit angeführten Beispielszenarien zeigen nicht nur vorstellbare Darstellungssituationen, sondern dienen auch als Beispiele für die Einsatzmöglichkeit als Präsentations- und Kommunikationsplattform. Die Anwendung schafft eine Basis zur Integration und

Teilhabe der Bevölkerung an Entwicklungsprozessen von beispielsweise infrastrukturellen Projekten. Mit der Entwicklung des Prototyps startete ein wichtiger Schritt in Richtung der Realisierung der Anwendung. Es wurden erste Funktionalitäten geschaffen, um die Schalldarstellung zu realisieren. Auch wenn die Funktionen des Prototyps noch sehr eingeschränkt sind, bietet er eine gute Basis für weitere Entwicklungen.

## 6.2. Ausblick

Während der Bearbeitung und auch im Nachgang zeigt die entwickelte Anwendung ein hohes Potential für Erweiterungen, allen voran die eigentliche Realisierung über den Prototyp hinaus. Im Verlauf der Implementierung wurde deutlich, dass Messungen der dargestellten Lautstärke notwendig sind, um eine natürliche Wiedergabe der Schallemissionen sicherzustellen. Hierzu sind entsprechende Messverfahren zu identifizieren und Methoden zur Skalierung der Lautstärke zu entwickeln.

Bezüglich der Algorithmen, welche in dieser Arbeit Anwendung fanden, kann zukünftig eine Zusammenarbeit mit anderen Anbietern von Berechnungsmodellen für Schallemissionen angestrebt werden. So wird beispielsweise im Konzept von punktförmigen Schallquellen ausgegangen. Für bestimmte Situationen kann eine linienförmige Schallquelle möglicherweise zielführender sein. Anbieter wie DataKustik nutzen schon jetzt hochkomplexe Algorithmen zur Berechnung der Schallausbreitung. Durch eine Kooperation und Erweiterung der Algorithmen würde zum einen die Genauigkeit der Schalldarstellung erhöht und zum anderen auch die Realitätsnähe und damit die Immersion des Nutzers noch verbessert werden können.

Das aktuelle Konzept basiert auf der Nutzung von virtuellen Umgebungen. Für zukünftige Entwicklungen ist es deshalb denkbar, die Anwendung auch um augmentierte Realitäten zu ergänzen. Dabei würden virtuelle Neuerungen, wie beispielsweise der Neubau einer Industrieanlage oder einer Autobahn, auf reale Umgebungen projiziert. Durch die integrierte GPS-Funktion des Tablets ließen sich zukünftige infrastrukturelle Projekte direkt am Ort des Geschehens darstellen und bieten damit eine Erweiterung der Möglichkeiten als Kommunikations- und Präsentationsplattform.

Ein weiterer interessanter Punkt für nachfolgende Entwicklungen wäre die Implementierung einer Sprachsteuerung zur Nutzerunterstützung innerhalb der Anwendung. Diese würde es ermöglichen, die Anwendung zu steuern und auf Menüs fast gänzlich zu verzichten. Dadurch würde die Erlernbarkeit und die Bedienung deutlich erleichtert und die Immersion stark erhöht werden.

Das Konzept der Anwendung ist auf die Darstellung von Schallemissionen ausgelegt. Für zukünftige Arbeiten kann das Konzept um zusätzliche Möglichkeiten erweitert werden. So ist es vorstellbar, die Anwendung beispielsweise auch zur Visualisierung von Luftverschmutzung zu nutzen oder Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für unterschiedliche Standorte anzustellen.

---

---

## Literaturverzeichnis

- [BISV06] 34. BIMSCHV: *Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung)*, 2006
- [BMVI19] BMVI: *Verkehr in Zahlen 2019/2020*, 2019
- [BöPr15] BÖHME, RENÉ; PRIGGE, ROLF: *Soziale Infrastruktur und Teilhabechancen: Ansätze zur Analyse der Kindertagesbetreuung und desganztägigen Lernens in Bremen*. Bremen: Institut Arbeit und Wirtschaft (IAW), Universität Bremen /Arbeitnehmerkammer Bremen, 2015
- [Bril09] BRILL, MANFRED: *Virtuelle Realität, Informatik im Fokus*. Berlin: Springer, 2009 — ISBN 978-3-540-85117-2
- [BrLS19] BRANDES, R.; LANG, F.; SCHMIDT, R. F. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie, Springer-Lehrbuch*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019 — ISBN 978-3-662-56467-7
- [Broc20] BROCKHAUS (ED.): *Infrastruktur | Brockhaus - Die Enzyklopädie: in vierundzwanzig Bänden.*, 2020
- [Broc97] BROCKHAUS (ED.): *Virtuelle Realität | Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 24 Bänden*. Mannheim: F. A. Brockhaus, 1997
- [Buhr09] BUHR, WALTER: *Infrastructure of the Market Economy* (Volkswirtschaftliche Diskussionsbeiträge Nr. 132–09): Universität Siegen, Fakultät Wirtschaftswissenschaften, Wirtschaftsinformatik und Wirtschaftsrecht, 2009
- [CaMS99] CARD, STUART; MACKINLAY, JOCK; SHNEIDERMAN, BEN: *Readings in Information Visualization: Using Vision To Think, Information Visualization - IVS*, 1999 — ISBN 978-1-55860-533-6
- [DBGJ19] DÖRNER, RALF; BROLL, WOLFGANG; GRIMM, PAUL; JUNG, BERNHARD: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. : Springer-Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-662-58860-4
- [Dieh07] DIEHL, STEPHAN: *Software visualization: visualizing the structure, behaviour, and evolution of software*. Berlin; New York: Springer, 2007 — ISBN 978-3-540-46504-1
- [DIN\_09] *DIN 1320:2009-12, Akustik - Begriffe*. Berlin: Beuth-Verlag, 2009
- [Dude16] DUDENREDAKTION(O.J): *Infrastruktur*. 6. Aufl. Mannheim, 2016
- [Dude20] DUDENREDAKTION(O.J): *Infrastruktur*, 2020
- [Feng16] FENG, JOSEPH: *Untersuchung des Einflusses von Wald auf die Schallausbreitung*. Berlin, Technische Universität Berlin, PhD Thesis, 2016
-

- [FZCH18] FAFARD, DYLAN BRODIE; ZHOU, QIAN; CHAMBERLAIN, CHRIS; HAGEMANN, GEORG; FELS, SIDNEY; STAVNESS, IAN: Design and implementation of a multi-person fish-tank virtual reality display. In: *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '18*. Tokyo, Japan: ACM Press, 2018 — ISBN 978-1-4503-6086-9, S. 1–9
- [GBHH19] GRIMM, PAUL; BROLL, WOLFGANG; HEROLD, RIGO; HUMMEL, JOHANNES: VR/AR-Eingabegeräte und Tracking. In: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer-Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-662-58860-4
- [Genu10] GENUIT, K. (Hrsg.): *Sound-Engineering im Automobilbereich*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010 — ISBN 978-3-642-01414-7
- [Goll11] GOLL, JOACHIM: *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011 — ISBN 978-3-8348-1578-1
- [HHHK17] HÄUPL, PETER; HÖFKER, GERRIT; HOMANN, MARTIN; KÖLZOW, CHRISTIAN; MAAS, ANTON; NOCKE, CHRISTIAN; RIESE, OLAF; WILLEMS, W. M. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017 — ISBN 978-3-658-16073-9
- [Hill06] HILL, LINDA L.: *Georeferencing: The Geographic Associations of Information*: MIT Press, 2006 — ISBN 978-0-262-08354-6
- [HSFE08] HENN, HERMANN; SINAMBARI, GHOLAM REZA; FALLEN, MANFRED; ERHARD, CHRISTOPH: *Ingenieurakustik: physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele; mit 36 Tabellen, Praxis*. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008 — ISBN 978-3-8348-0255-2
- [ISO\_11] *ISO/IEC 25010:2011-03 Software-Engineering - Qualitätskriterien und Bewertung von Softwareprodukten (SQuaRE) - Qualitätsmodell und Leitlinien*. Berlin: Beuth-Verlag, 2011
- [Kobl08] KOBLISCHKE, DAGMAR: *Soziale Infrastruktur und wirtschaftliche Entwicklung. Ein paradigmatischer Beitrag zur Diskussion über soziales Kapital und die Reduktion von Armut in Chile*. Wien, Wirtschaftsuniversität Wien, PhD Thesis, 2008
- [KOHT19] KINAST, BENJAMIN; ORSCHULIK, NILS; HEUVEN, RENÉ; TABAK, THOMAS; BIRMES, BERNHARD; HEUVEN, JESSICA; CABRITA, MIRIAM; TABAK, MONIQUE: *Virtual Reality in der Schmerztherapie – Status quo und Perspektiven: Möglichkeiten und Grenzen neuer Technologien in der Pflege*. 2019 — ISBN 978-3-11-055838-8, S. 91–110
- [KuAT17] KURUBACAK, G.; ALTINPULLUK, H.; TOMEI, L. (Hrsg.): *Mobile Technologies and Augmented Reality in Open Education: Advances in Educational Technologies and Instructional Design*: IGI Global, 2017 — ISBN 978-1-5225-2110-5
- [Laak08] VAN LAAK, DIRK: Infrastrukturen und Macht. In: DUCEPPE-LAMARRE, F.; ENGELS, J. I. (Hrsg.): *Umwelt und Herrschaft in der Geschichte. Environnement et pouvoir: une approche historique, Ateliers des Deutschen Historischen Instituts Paris 2*, 2008, S. 106–114
-

- [Lang13] DE LANGE, NORBERT: *Geoinformatik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-34806-8
- [Llor18] LLORCA, JOSEP: Virtual Reality for Urban Sound Design: A Tool for Architects and Urban Planners. In: ACEVES-FERNANDEZ, M. A. (Hrsg.): *Artificial Intelligence*. Rijeka : IntechOpen, 2018
- [LSVA07] LENTZ, TOBIAS; SCHRÖDER, DIRK; VORLÄNDER, MICHAEL; ASSENMACHER, INGO: Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* Bd. 2007 (2007), Nr. 1, S. 070540
- [Mace95] MACEACHREN, ALAN: *How maps work: Representation, Visualization & Design*, 1995 — ISBN 978-1-57230-040-8
- [Mazz09] MAZZA, RICCARDO: *Introduction to Information Visualization*. London: Springer London, 2009 — ISBN 978-1-84800-218-0
- [Möse15] MÖSER, MICHAEL: *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015 — ISBN 978-3-662-47703-8
- [Möse18] MÖSER, M. (Hrsg.): *Psychoakustische Messtechnik, Fachwissen Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-56630-5
- [Müll05] MÜLLER, ANDREAS: Datenexploration und Wissenskommunikation in der Geovisualisierung. In: *KN - Journal of Cartography and Geographic Information* Bd. 55 (2005), Nr. 5, S. 236–243
- [MüMö17] MÜLLER, GERHARD; MÖSER, MICHAEL: *Beurteilung von Schallimmissionen: Gesetze - Vorschriften - Normen - Richtlinien*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017 — ISBN 978-3-662-55389-3
- [Munz14] MUNZNER, TAMARA: *Visualization analysis and design* : CRC press, 2014 — ISBN 1-4987-5971-8
- [NeHL10] NEGENBORN, R. R.; HELLENDORF, H.; LUKSZO, Z. (Hrsg.): *Intelligent infrastructures, International series on intelligent systems, control and automation: science and engineering*. Dordrecht: Springer, 2010 — ISBN 978-90-481-3597-4
- [PrDa10] PREIM, BERNHARD; DACHSELT, RAIMUND: *Interaktive Systeme, eXamen.press*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010 — ISBN 978-3-642-05401-3
- [Ratf11] RAT FÜR SOZIAL- UND WIRTSCHAFTSDATEN: *Endbericht der AG „Georeferenzierung von Daten“ des RatSWD*, 2011
- [Ratf12] RAT FÜR SOZIAL- UND WIRTSCHAFTSDATEN: *Georeferenzierung von Daten. Situation und Zukunft der Geodatenlandschaft in Deutschland*. 1. Aufl. Berlin : SCIVERO Verlag, 2012
-

- [RMDI13] RUOTOLO, FRANCESCO; MAFFEI, LUIGI; DI GABRIELE, MARIA; IACHINI, TINA; MASULLO, MASSIMILIANO; RUGGIERO, GENNARO; SENESE, VINCENZO PAOLO: Immersive virtual reality and environmental noise assessment: An innovative audio–visual approach. In: *Environmental Impact Assessment Review* Bd. 41 (2013), S. 10–20
- [RuWi20] RUESS, PATRICK; WINGARTZ, NATHALIE: Virtual Reality als Instrument zur Gewinnung von Nutzerfeedback zu Technologieszenarien am Beispiel urbaner Mobilität. In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* Bd. 57 (2020), Nr. 2, S. 230–243
- [ScWK12] SCHIEWE, JOCHEN; WENINGER, BEATE; KORNFELD, ANNA-LENA: *Analyse und Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit von Lärmkarten in der Öffentlichkeitsbeteiligung*, 2012
- [SGSF11] SOUMAN, J. L.; GIORDANO, P. ROBUFFO; SCHWAIGER, M.; FRISSEN, I.; THÜMMEL, T.; ULBRICH, H.; LUCA, A. DE; BÜLTHOFF, H. H.; U. A.: CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments. In: *ACM Transactions on Applied Perception* Bd. 8 (2011), Nr. 4, S. 1–22
- [Stro08] STROHMEIER, STEFAN: *Informationssysteme im Personalmanagement: Architektur, Funktionalität, Anwendung ; [mit Online-Service], Studium*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008  
— ISBN 978-3-8348-0310-8
- [SWOL11] SPÄH, MORITZ; WEBER, LUTZ; OESTERREICHER, TIMO; LIEBL, ANDREAS: *Schallschutzpflanzen – Optimierung der Abschirmwirkung von Hecken und Gehölzen* ( Nr. B-BA 4/2010). Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2011
- [TPAM16] THEIS, S; PFENDLER, C; ALEXANDER, TH; MERTENS, A; BRANDL, CH; SCHLICK, CH M: *Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes*: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2016
- [VDI\_06] *VDI 3723-2:2006-03, Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen - Teil 2: Qualitätsprüfung bei der Beurteilung von Geräuschsituationen*. Berlin: Beuth-Verlag, 2006
- [VDI\_93] *VDI 3723-1:1993-05, Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen*. Berlin: Beuth-Verlag, 1993
-

## Internetquellenverzeichnis

- [www\_01] *Lärminderung*. URL <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/laermschutz/laermschutz-im-ueberblick/laermminderung/>. - abgerufen am 2020-06-22
- [www\_02] *Geoportal.de - Geodaten aus Deutschland*. URL <https://www.geoportal.de/portal/main/>. - abgerufen am 2020-06-10
- [www\_03] *Destatis - Internetportal des Statistischen Bundesamtes*. URL [https://www.destatis.de/DE/Home/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html). - abgerufen am 2020-06-03
- [www\_04] *Statista – Statistik-Portal*. URL <https://de.statista.com/themen/786/verkehrsinfrastruktur/>. - abgerufen am 2020-06-03
- [www\_05] *CadnaA – Stand der Technik beim Immissionsschutz*. URL <https://www.datakustik.com/de/produkte/cadnaa/cadnaa/>. - abgerufen am 2020-08-22
-

## Bildquellen

- [img\_01] *VR-Headset Oculus Rift*. URL [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61vilOmXMCL.\\_SL1200\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61vilOmXMCL._SL1200_.jpg). - abgerufen am 2020-06-18
- [img\_02] *Projektionsraum - 3D-Cube TU Chemnitz*. URL <https://media.tag24.de/1/3/q/3q501sqg8nl12h2r.jpg>. - abgerufen am 2020-06-19
- [img\_03] DÖRNER, RALF ; BROLL, WOLFGANG ; GRIMM, PAUL ; JUNG, BERNHARD: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. : Springer-Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-662-58860-4
- [img\_04] DÖRNER, RALF ; BROLL, WOLFGANG ; GRIMM, PAUL ; JUNG, BERNHARD: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. : Springer-Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-662-58860-4
- [img\_05] TEATHER, ROBERT J. ; STUERZLINGER, WOLFGANG: Visual aids in 3D point selection experiments. In: *Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction - SUI '14*. Honolulu, Hawaii, USA : ACM Press, 2014 — ISBN 978-1-4503-2820-3
- [img\_06] FAFARD, DYLAN BRODIE ; ZHOU, QIAN ; CHAMBERLAIN, CHRIS ; HAGEMANN, GEORG ; FELS, SIDNEY ; STAVNESS, IAN: Design and implementation of a multi-person fish-tank virtual reality display. In: *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '18*. Tokyo, Japan : ACM Press, 2018 — ISBN 978-1-4503-6086-9
- [img\_07] *3Dconnexion Spacemouse*. URL [https://www.3dconnexion.de/spacemouse\\_pro/img/gallery\\_05\\_iso\\_left.jpg](https://www.3dconnexion.de/spacemouse_pro/img/gallery_05_iso_left.jpg). - abgerufen am 2020-06-26
- [img\_08] GRIMM, PAUL ; BROLL, WOLFGANG ; HEROLD, RIGO ; HUMMEL, JOHANNES: VR/AR-Eingabegeräte und Tracking. In: *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. : Springer-Verlag GmbH, 2019 — ISBN 978-3-662-58860-4
- [img\_09] *Bewegungsplattform für VR - Omni by Virtuix*. URL <https://cdn.skyhighpartyrentals.com/media/catalog/product/o/m/omni-virtual-reality-houston.jpg>. - abgerufen am 2020-06-26
-

---

---