

Innovationszentrum für Windenergie,  
Systemintegration und Speicher

## Abschlussbericht Sachbericht

Starke Fachhochschulen – Impuls für die Region (FH-Impuls)  
Fördermaßnahme im Rahmen des Programms „Forschung an Fachhochschulen“

### **E2\_X-Eptance-Explore – Mobiles Mixed-Reality-System zur 3D-Visualisierung und Auralisation von Windenergieanlagen (FKZ: 13FH1E02|A)**

Eigereicht durch:

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg)

Berichtszeitraum 01.09.2019 – 28.02.2022

AutorInnen: Prof. Dr. Birgit Wendholt, Iwer Petersen

<b>Projektleitung</b>	
Prof. Dr. Birgit Wendholt  HAW Hamburg Berliner Tor 7   20099 Hamburg +49.40.428 75-6080 <a href="mailto:birgit.wendholt@haw-hamburg.de">birgit.wendholt@haw-hamburg.de</a>	Iwer Petersen Wissenschaftlicher Mitarbeiter HAW Hamburg Stiftstrasse 69   20099 Hamburg
<b>Projektbüro</b>	
Mike Blicker (Partnerschaftssprecher)  HAW Hamburg Steindamm 96   20099 Hamburg +49.40.428 75-5846 <a href="mailto:Mike.blicker@haw-hamburg.de">Mike.blicker@haw-hamburg.de</a>	Dr. Oliver Arendt (Innovationsmanager Forschung)  HAW Hamburg Steindamm 96   20099 Hamburg +49.40.428 75- 5854 <a href="mailto:oliverarendt@haw-hamburg.de">oliverarendt@haw-hamburg.de</a>

# Inhalt

I Kurzdarstellung .....	4
1.1    Projektpartnerschaft X-Energy .....	4
1.2    Einordnung von X-Eptance Explore in der Partnerschaft X-Energy .....	4
1.3    Aufgabenbeschreibung .....	6
1.4    Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele .....	7
1.5    Zusammenarbeit mit dem Projektpartner .....	10
1.6    Arbeitsplan, Meilensteine und Übersicht Ergebnisse .....	10
II Schlussbericht – Eingehende Darstellung .....	14
2    Sachbericht – detaillierte Beschreibung der Arbeitspakete im Projekt X-Eptanxe Explore .....	14
2.1    AP 1a Definition der Schnittstelle zu Messungen im Rahmen von X-Eptance Impulse....	14
2.2    AP 1b Spezifikation geeigneter Hard- und Software (VR) .....	14
2.3    AP 1c 3D-Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physischen Eigenschaften im Betrieb	15
2.4    AP 1c.1 (Neu durch Änderungsantrag) Erstellen eines parametrischen Synthese-Modells für die Haupt-Geräuschquellen einer WEA für die dynamische Modulation durch Umgebungsbedingungen .....	16
2.5    AP 1d Untersuchung geeigneter Verfahren für die Nachbildung der realen visuellen Umgebung für verschiedene Plattformen (quasi-mobile Virtual-Reality Technik / mobile Virtual-Reality Technik). .....	19
2.6    AP 1e Entwurf mit Interaktions- und Navigations-Konzept für ein MAVR-WEA-System. .	21
2.7    AP 1f Entwicklung von Prototypen für MAVR-WEA .....	24
2.8    AP 2a Definition der Schnittstelle zu Messungen im Rahmen von X-Eptance Impulse....	25
2.9    AP 2b Spezifikation geeigneter Hard- und Software (AR) .....	25
2.10    AP 2c 3D Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physikalischen Eigenschaften im Betrieb.....	25
2.11    AP 2d Entwurf mit einem Gesten-basierten Interaktions-Konzepts für ein MAAR-WEA-System	25
2.12    AP 2e Entwicklung von Prototypen für MAAR-WEA.....	26

3 Fazit.....	28
Literatur .....	29

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Handlungsfelder, Schwerpunktbereiche und Projekte der Innovationsallianz .....	5
Abbildung 2: Inhaltliche Bezüge und Interaktionen im Themenbereich Windenergie .....	5
Abbildung 3: Zusammenhang X-Eptance Impulse und X-Eptance Explore .....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung räumliches Schallfeld.....	14
Abbildung 6: Pipeline zur Simulation von akustischen Ausbreitungseffekten.....	14
Abbildung 7 Animation des WEA Modells. Blau: Rotation, Grün: Blattpitch, Rot: Azimut .....	16
Abbildung 8: Punktschallquellen am WEA Blatt. Kegelförmige Ausbreitung des Blattspitzengeräusches, Zylinderförmige Ausbreitung von der Blatt Hinterkante.....	17
Abbildung 9: Ableitung eines theoretischen Faktors für die Frequenz-verschiebung durch den Dopplereffekt aus der gemessenen Distanz zwischen einer WEA-Blattspitze und einer Hörer*in am Boden in der virtuellen Umgebung (Diskontinuitäten resultieren aus Rundungsfehlern von Positionen in Fließkommazahlen einfacher Präzision).....	18
Abbildung 10: Wasserfall-Diagramm einer Aufnahme einer WEA im Betrieb aus dem X-Eptance Impulse Projekt. Die leicht nach vorne geneigte Charakteristik der tonalen Anteile lässt sich durch den Dopplerfaktor erklären. ....	18
Abbildung 11: Gegenüberstellung der rekonstruierten Umgebung (links) und einem Satellitenbild (rechts, Google Maps). .....	20
Abbildung 12: Kontinuierliche Bewegung in Richtung des Controllers oder in Blickrichtung. ....	22
Abbildung 13: Teleportation an einen weiter entfernten Ort. Links Infotafel mit Umgebungsinformationen.....	23
Abbildung 14: Kreismenü zur Manipulation von Tageszeit und Jahreszeit (Icon defekt). .....	23
Abbildung 15: Kreismenü zur Manipulation von Windgeschwindigkeit, -richtung, Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck.....	24
Abbildung 16: Konzept für geolokalisierte Aufstellung eines virtuellen Windparks v.l.n.r: Automatische Positionsbestimmung des Benutzers, Manuelle Feinjustierung Standort, Auswahl für Standorte und Typ von WEAs.....	26
Abbildung 17: Virtuelle WEA als Überlagerung über einem Kamerabild. ....	27

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Übersicht der Meilensteine .....	11
---	----

# I Kurzdarstellung

## 1.1 Projektpartnerschaft X-Energy

Mit der strategischen Projektinitiative X-Energy möchte die Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg zu einem führenden Innovationszentrum zur Entwicklung von Lösungen für die Zukunftsfähigkeit des Energiesystems und damit zum Innovationsmotor der Metropolregion Hamburg werden.

Nach der Fokussierung auf den Auf- und Ausbau erneuerbarer Erzeugungsstrukturen steht in der nächsten Phase der Energiewende der Umbau des Energiesystems im Vordergrund. Dabei geht es um den Erhalt eines sicheren und stabilen Energiesystems, dass aus einem immer größer werdenden Anteil erneuerbarer, fluktuierender Stromproduktion gespeist wird. X-Energy greift in diesem Zusammenhang die Forschungsthemen Windenergie, Speicher und Systemintegration auf.

Im Bereich der Windenergie arbeitet die X-Energy Partnerschaft unter anderem an der Effizienzsteigerung von Windenergieanlagen (WEA) und der Reduzierung der Stromerzeugungskosten durch neue WEA-Konzepte wie Zweiblatt- und Multirotoranlagen. Es geht zudem um die bessere Integration von Windparks in das Gesamtenergiesystem, um das Stromnetz zu stabilisieren. Flankierend erfolgt die Betrachtung der Technikfolgen und der Akzeptanz einer zunehmenden Anzahl und Größe von WEA in unserer Gesellschaft. Es werden Lösungen für die Reduzierung von Schallemissionen und den Schutz von Fledermäusen in Windparks entwickelt sowie die Auswirkungen einer optimierten Sicherheitsbeleuchtung auf die Akzeptanz in der lokalen Bevölkerung untersucht.

## 1.2 Einordnung von X-Eptance Explore in der Partnerschaft X-Energy

Im Rahmen der X-Energy Strategie ist das explorative Projekt X-Eptance Explore zum 01.09.2019 bewilligt worden. Es baut auf dem bereits zuvor (zum 01.04.2017) bewilligten Impulsvorhaben X-Eptance Impulse auf und ist wie dieses dem Themenbereich Windenergie sowie dem Handlungsfeld „Umwelt und Akzeptanz“ zugeordnet. Die Einordnung des Projektes im Vorhaben X-Energy sowie die Bezüge der beiden Projekte zueinander sind in den folgenden Abbildungen illustriert.

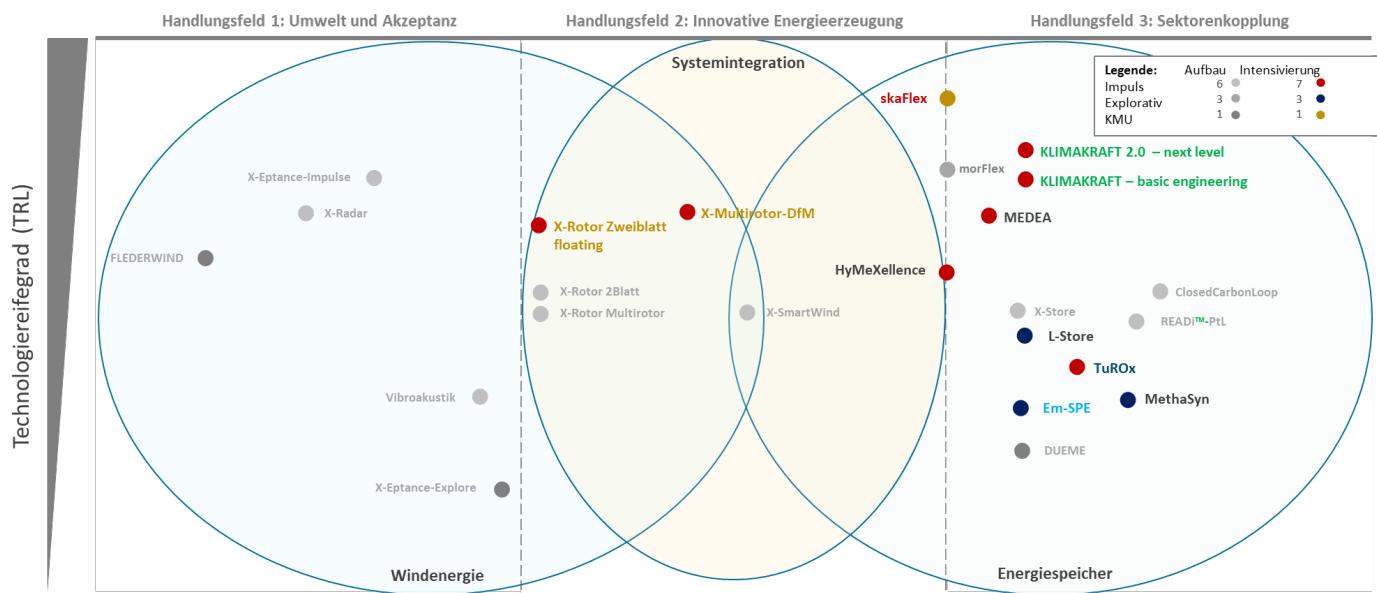


Abbildung 1: Handlungsfelder, Schwerpunktbereiche und Projekte der Innovationsallianz

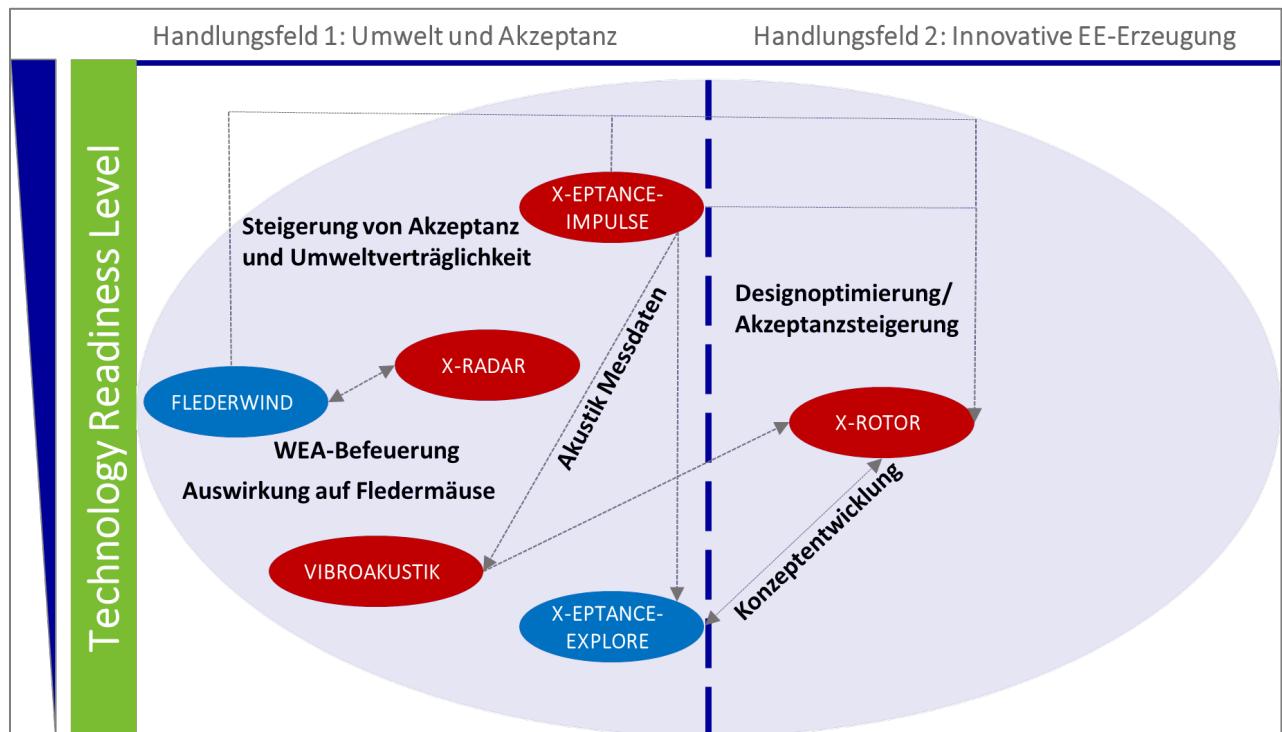


Abbildung 2: Inhaltliche Bezüge und Interaktionen im Themenbereich Windenergie

Ziel des Teilprojektes X-Eptance ist die Verbesserung der Nachhaltigkeit und Akzeptanz von Windenergieanlagen (WEA). Der Schwerpunkt des bereits bewilligten Impulsprojekts *X-Eptance-Impulse (XE)* (Förderkennzeichen: 03FH1I011A) liegt auf der Entwicklung der mit den Industriepartnern im Zeitraum von wenigen Jahren umsetzbaren Maßnahmen. Entwicklungsergebnisse, deren Umsetzbarkeit mit höheren Risiken verbunden sind und daher

keine Barmittelunterstützung durch Industriepartner erhalten konnten, wurden im separaten, explorativen Teilprojekt *X-Eptance-Explore (XEE)* zusammengefasst.

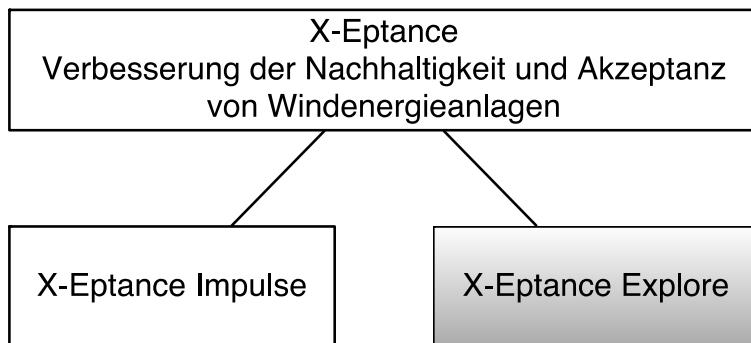


Abbildung 3: Zusammenhang X-Eptance Impulse und X-Eptance Explore

### 1.3 Aufgabenbeschreibung

Das Projekt X-Eptance-Explore (XEE) greift die Arbeiten von X-Eptance Impulse (XEI) auf und hat das Ziel, den in XEI angestrebten Ergebnissen (unter anderem: MEMS-Sensorik, Aktuatorik, Signalverarbeitung) durch mobile, visuell-akustische Exploration von WEA in einer Virtual-Reality (VR)- und Augmented-Reality (AR) Umgebung bereits während ihres Entstehens neue Anwendungspotenziale zu erschließen. Die Schnittstellen der Teilvorhaben XEI und XEE ermöglichen dies in hervorragender Weise, da in XEI Sensoren und Signalverarbeitungsansätze entstehen. Es wurde das Ziel verfolgt, dass die für die Konzeptstudien in XEE zunächst mit konventioneller Messtechnik ermittelten Zeitreihen zum Projektende durch Zeitreihen ersetzt werden können, die mit Hilfe der neu entwickelten MEMS-Sensoren erfasst werden. Das Teilvorhaben XEE leistet somit wichtige Vorarbeiten zur weiteren technologischen Anschlussfähigkeit und Weiterentwicklung der in XEI angestrebten Ergebnisse. Im Teilvorprojekt XEI entsteht ein innovatives und strukturell integrierbares vielkanaliges Messsystem, das hohe räumliche und zeitliche Auflösungen von vornehmlich Luft- bei geeigneter Sensorwahl/-platzierung aber auch Körperschallereignissen an Windenergieanlagen erlaubt. Diese Technologie bildet die Grundlage für weitere Innovationen. Basierend auf den akustischen und visuellen Messungen realer WEA soll ein mobiles akustisches Mixed-Reality System die virtuelle Begehung für ähnliche Anlagen erfahrbar machen und dazu beitragen, die Akzeptanz von geplanten WEA zu steigern. Dabei soll sowohl eine rein virtuelle Lösung mit möglichst realistischer Darstellung der realen Umgebung als auch eine AR-Lösung entstehen, um das geeignete Instrument für das Projektziel zu ermitteln.

## 1.4 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

### Aktueller Stand der F&E:

Ein Blick auf den Stand der Technik zeigt, dass viele für VR- und AR-Anwendungen relevante Technologien bereits z.T. zu vertretbaren Preisen vorhanden sind. Der Markt bietet VR- Brillen in unterschiedlichen Preis-Kategorien wie z.B. HTC Vive, Oculus Rift oder Google CardBoard<sup>1</sup> an. Insbesondere das CardBoard ist aufgrund des Betriebs mit einem marktüblichen Smartphone ein Vertreter für eine kostengünstige und erweiterbare Lösung zur Entwicklung eines Mobilen Akustischen Virtual Reality (MAVR) Systems. Auch AR-Brillen, die das Lokalisieren im Außenbereich ermöglichen und deren Darstellungen mittlerweile auch für den Außenbereich optimiert werden (wie z.B. bei der Microsoft Hololens), sind am Markt verfügbar, allerdings noch zu sehr hohen Preisen, was den Einsatz der hier vorgeschlagenen Lösung auf Betreiber und Behörden einschränkt. Allerdings sind alternative Lösungen auf Smartphones und Tablets als kostengünstige AR-Lösung verfügbar. Das Android SDK / NDK<sup>2</sup> sind frei verfügbare Umgebungen, die sowohl Werkzeuge für stereoskopische 360° Viewer als auch Bibliotheken für HRTF bereits integrieren. Mit ARCore, Vuforia (der Firma PTC) sowie ARToolkit stehen Softwarebibliotkeken für die Entwicklung von AR-Lösungen bereit. Hinzu kommen die Entwicklungstools der Anbieter von AR-Brillen. Mobile Interaktion in VR und AR verlangt kontaktfreie Interaktion unter Verwendung von tragbaren Geräten. Das Leap-Motion Orion DevKit<sup>3</sup> unterstützt MidAir-Interaktion in 3D (zum Begriff vgl. [1]), ist für VR Anwendungen optimiert und soll in naher Zukunft auch für mobile Endgeräte verfügbar sein. Alternativ sind sehr kleine tragbare Interaktions-Devices denkbar wie das Myo Armband<sup>4</sup> oder die Google Soli Lösung<sup>5</sup>. Um Realitäts-getreuen visuellen Content zu erzeugen, bieten sich heute am Markt eine Reihe von speziellen Kameras und Verfahren an. Vollsphären-Kameras wie z.B. die Samsung Gear 360<sup>6</sup> ermöglichen die automatisierte Produktion von 360° Kugelpanoramen. Ein von der Firma Realities<sup>7</sup> entwickeltes Verfahren ermöglicht eine echte 3D Rekonstruktion großformatiger Outdoor-Szenen. Auch in [2] wird eine Technik zur 3D Rekonstruktion vorgestellt, die sogar auf einem mobilen Endgerät lauffähig ist.

---

<sup>1</sup> <https://www.google.com/get/cardboard/>

<sup>2</sup> <http://developer.android.com/index.html>

<sup>3</sup> <https://developer.leapmotion.com/>

<sup>4</sup> <https://www.myo.com/>

<sup>5</sup> <https://www.google.com/atap/project-soli/>

<sup>6</sup> <http://www.samsung.com/global/galaxy/gear-360/>

<sup>7</sup> <http://realities.io/>

Die Forderung Immersion virtueller Welten durch Integration mit räumlicher Akustik zu verbessern ist nicht neu. Durand [3] gibt einen umfassenden Überblick über Techniken, psychologische Grundlagen und Anwendungen für 3D-Sound in Mixed-Reality-Anwendungen.

Härmä et.al. [4] stellen einen Versuchsaufbau für ein tragbares, mobiles AR-Audiosystems vor. Probanden sind mit Kopfhörern ausgestattet, die sowohl das Wahrnehmen realer Lautsprecher als auch virtueller Soundquellen ermöglichen. Anhand wissenschaftlicher Testmethoden messen die Autoren Eigenschaften wie die Verwechslungsrate zwischen realer und virtueller Quelle sowie zwischen Front und Back Wahrnehmung. Auch wenn der Titel der Veröffentlichung dies suggeriert, handelt es sich bei dem Versuchsaufbau nicht um ein mobiles System: die Messungen wurden auf einem Stuhl mit fixierter Kopfposition durchgeführt.

In Postma et.al. [5] wird ein Kalibrierungsverfahren zur Simulation akustischer Modelle in Gebäuden unter Verwendung Raum-akustischer Parameter vorgestellt. Die Autoren bewerten die Qualität ihrer Simulation durch Vergleich mit gemessenen Daten. Die Simulation wird auf stationären Rechnern durchgeführt, die Übertragung der Simulations-Ergebnisse auf eine mobile VR-Lösung wird angedeutet aber nicht realisiert. Nach Vorländer et.al. [6] werden in heutigen akustischen online VR-Anwendungen die Simulationsdaten von leistungsfähigen Rechnern über ein Funknetz auf die Kopfhörer übertragen. Laut der Autoren sind die heutigen Simulationsverfahren für eine realistische akustische Wahrnehmung in offline-VR zu komplex und rechenintensiv. Ein Kompromiss zwischen Komplexität und Qualität der Perzeption sei Gegenstand zukünftiger Forschung. Wefers [7] stellt effiziente Algorithmen zur Echtzeit-Auralisation vor, deren Eignung für mobile Geräte zu validieren wäre. Als Alternative zur parametrischen Präzision, dem Ansatz der akustischen Simulation, wird in neuerer Zeit die perzeptive Präzision über sogenannte „acoustic soundscapes“ vorgeschlagen ([8], [9]). Hier kommen u. A. Verfahren aus der Audio-Video Produktion in der Musikindustrie zum Einsatz.

Mixed-Reality-Lösung für WEA finden sich in unterschiedlichen Ausprägungen in der Forschung und der Industrie. Die Arbeitsgruppe PLUS<sup>8</sup> an der ETH-Zürich hat mit VisAsim [10] ein Werkzeug entwickelt, in der in einem 3D-Landschaftsmodell unter Berücksichtigung unterschiedlicher Umgebungs- und Windkraftrad-Parameter die Lärmausbreitung von Windparks simuliert wird. Die Simulation läuft auf stationären Rechnern mit einer Visualisierung auf normalen Displays. MVAL, ein zerlegbares, transportables visuell-akustisches Labor dient als Demonstrationsraum für eine breite Öffentlichkeit. VisAsim verwendet bereits alle Technologien, die auch im Projekt XEE zum Einsatz kommen, allerdings handelt es sich hier nicht um eine mobile tragbare VR-Lösung. Auch

---

<sup>8</sup> <http://www.plus.ethz.ch/de/>

wurde der visuelle Content nicht automatisiert erstellt. Eine vergleichbare Lösung findet sich in Papakonstantinou et al. [11]. Die Universität Hull (England) hat 2013 mit dem Hull Immersive Visualisation Environment (HIVE)<sup>9</sup> eine 3D-CAVE Lösung als Trainingscenter für das Betriebspersonal von Offshore-Windparks eröffnet. Auch der Elbe-Dom<sup>10</sup> des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) ist eine VR-CAVE Lösung. Eine Projektionsfläche von > 300m<sup>2</sup> ermöglichen den virtuellen Nachbau von großen realen Anlagen. Infrarot-Tracking und Direct-Input-Geräte unterstützen die Interaktion mehrerer Benutzer mit der virtuellen Welt. Elbe-Dom hat sich in der Vergangenheit u.A. als Labor zur virtuellen Planung und Begehung von WEA positioniert. Im Gegensatz zu diesen stationären Lösungen, ist die quasi-mobile Variante der MAVR eine transportable Lösung, die einen hohen Grad an Immersion verspricht.

COMOS (eine Produktfamilie der Firma Siemens) unterstützt den Planungsprozess komplexer Industrieanlagen. COMOS Walkinside ITS (Immersive Training Simulator)<sup>11</sup> erlaubt das virtuelle Begehen einer Anlage mittels Avataren, so dass auch komplexe Teamprozesse simuliert werden können. Die virtuelle Umgebung, die auf stationären Rechnern simuliert wird, kann mit Umgebungsgeräuschen angereichert werden.

In Zhang et al. [12] wird eine mobile Augmented-Reality-Lösung für das Einblenden virtueller Windräder in eine Landschaft vorgestellt. Die mobile Applikation, die auf einem Tablett realisiert ist, soll Anwohnern einen visuellen Eindruck von der geplanten Anlage ermöglichen. Mittels Gyroskops und GPS werden die Windräder auf View-Point korrekte Positionen gesetzt. Ähnliche Funktionen bietet das Produkt VentusAR<sup>12</sup> der Firma Linknode. Allerdings verzichten diese Lösungen auf die akustische Simulation.

Mit dem Ziel die Akzeptanz von Windenergieanlagen in der Bevölkerung zu verbessern hat der EnergieDialog NRW das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation und die Kommunikationswissenschaftler der Universität Hohenheim beauftragt, den Beitrag von Mixed-Reality-Visualisierungstechniken für die Glaubwürdigkeit und Verständlichkeit von Bauplanungen zu untersuchen. Mit MAVR und MAAR könnte ein signifikanter Beitrag zu dem Forschungsziel geleistet werden.

---

<sup>9</sup> <http://www2.hull.ac.uk/researchandinnovation/energyandtheenvironment/virtualrealitywindturbines.aspx>

<sup>10</sup> <http://www.iff.fraunhofer.de/de/labore/elbe-dom.html>

<sup>11</sup> [http://w3.siemens.com/mcms/plant-engineering-software/de/comos-lifecycle/comos-walkinside/walkinside\\_its/Seiten/Default.aspx](http://w3.siemens.com/mcms/plant-engineering-software/de/comos-lifecycle/comos-walkinside/walkinside_its/Seiten/Default.aspx)

<sup>12</sup> <http://www.ventusar.com/>

### **Innovationsgehalt des Vorhabens:**

Mit dem MAVR wird eine der ersten vollständig mobilen akustischen VR-Lösungen für die Begehung von WEA vorgeschlagen, die den Vergleich von gemessenen und simulierten Daten unterstützt. Der Vorschlag geht daher weit über die Anforderungen der Organisation EnergieDialog NRW hinaus. Die obigen Ansätze zur mobilen akustischen VR sind auf stationäre Systeme angewiesen, da die Simulation der akustischen Daten auf einem leistungsstarken Rechner erfolgen muss. Sie sind daher auf eine Laborumgebung eingeschränkt. Ebenso sind CAVE-Lösungen für VR-Applikation stationäre Laborsysteme, die nur einen eingeschränkten Nutzerkreis haben. Weiterhin ist die kontaktfreie Interaktion in MAVR eine am Markt noch nicht vertretene Lösung, die die Bedienbarkeit der VR-Lösung im Allgemeinen sehr vereinfachen wird. Mit MAAR wird eine der ersten vollständig mobilen AR-Lösung mit Integration akustischer Daten vorgeschlagen, die Anlagen als realistische 3D-Modelle präsentiert und simuliert.

### **Technische und wirtschaftliche Vorteile:**

Das MAVR-WEA und das MAAR-WEA erlauben einen flexiblen Einsatz von Demonstrationsprototypen zum erlebbaren Ist-Zustand (visuell wie akustisch) einer WEA. Beide Lösungen sind nicht nur Werkzeuge zur Steigerung der Akzeptanz, sondern eine flexible Präsentations- und Marketingplattform für die Akquise von Folgeprojekten. Eine mobile Lösung auf Basis des CardBoards qualifiziert MAVR als Kandidat für eine Consumer Lösung aufgrund geringer Anschaffungskosten. Gleiches gilt für die MAAR Lösung auf Basis von Smartphones und/oder Tablets. Denkbar wären in beiden Fällen z.B. auch Apps zum Nacherleben großer Konzerte oder Veranstaltungen.

## **1.5 Zusammenarbeit mit dem Projektpartner**

Am explorativen Projekt XEE waren keine Industriepartner beteiligt. Ein intensiver fachlicher Austausch erfolgte mit den Projekten der Partnerschaft, und hier insbesondere mit dem Projekt XEI.

## **1.6 Arbeitsplan, Meilensteine und Übersicht Ergebnisse**

Das Projekt XEE gliederte sich in 2 Arbeitspakte und beinhaltete 6 Meilensteine. Coronabedingt konnten 2020 keine wiss. Mitarbeitenden eingestellt werden. Dies konnte zum März 2021 nachgeholt werden. Hierdurch entstand entsprechender Zeitverzug. Weiterhin zeigte sich bei der

Bearbeitung der Arbeitspakete, dass der Aufwand höher war als zuvor geschätzt. Zudem ergab sich bei der Bearbeitung die Notwendigkeit eines neuen Unterarbeitspaketes im AP1c (AP1c.1). Aus diesen Gründen wurde ein Antrag auf Verlängerung und Umwidmung der Mittel gestellt und bewilligt.

Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Meilensteine und die jeweiligen Erkenntnisse und Ergebnisse, welche zu den oben aufgeführten Arbeitspaketen gehören.

Zieltermin	Meilenstein	Fertigstellungs-datum	Bemerkungen/Projektstatus
01.02.2019	MS1: Definition der Schnittstellen zu Messungen	15.10.2019	Projektstart 9 ½ Monate später
01.03.2019	M2: Spezifikation geeigneter Hard- und Software	15.11.2019	Projektstart 9 ½ Monate später
01.10.2019	MS3: 3D-Nachbildung von Umgebung und WEA	15.06.2020	Projektstart 9 ½ Monate später
01.04.2020	MS4: Konzept und Prototyp MAVR-WEA	15.06.2021	Projektstart 9 ½ Monate später Verzögerung durch nicht mehr verfügbare Software und größerer Aufwand bei der Einarbeitung in die VR-Umsetzung sowie Corona-bedingt keine Unterstützung durch studentische Hilfskräfte.
01.05.2020	MS5: Spezifikation geeigneter Hard- und Software	15.02.2021	Projektstart 9 ½ Monate später Verzögerung in MS4
01.01.2021	MS6: Konzept und Prototyp MAAR-WEA	31.03.2022	Projektstart 9 ½ Monate später Verzögerung in MS4

Tabelle 1: Übersicht der Meilensteine

Die wesentlichen Ergebnisse aus dem Projekt XEE lauten:

*AP 1a Definition der Schnittstelle zu Messungen im Rahmen von X-Eptance Impulse*

Da die Daten aus dem Vorgängerprojekt XEI nicht in strukturierter Form vorlagen wurde die Definition der Schnittstelle zu den Messungen ersetzt durch die Analyse der von der Windenergieanlage (WEA) erzeugten Geräusche. Dazu wurden Blattspitzen und Blatt-Hinterkante als Haupt-Schallerzeuger identifiziert und modelliert. Aus den Aufnahmen wurde auf die akustischen Signalcharakteristiken der Hauptschallerzeuger geschlossen.

*AP 1b Spezifikation geeigneter Hard- und Software (VR)*

Für beide Lösungen (MAVR / MAAR) wurde „Unreal Engine 4“<sup>13</sup> als Software-Basis eingesetzt. Ein „Valve Index“ VR-System wurde für die MAVR Lösung angeschafft. Als Entwicklungsrechner wurde ein leistungsstarker PC (4-8 CPU-Kerne, 32-64GB Ram, aktuelle Gaming-Grafik, Windows 10) verwendet.

*AP 1c 3D-Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physischen Eigenschaften im Betrieb*

Die beiden im Curslacker Windpark vorhandene Anlagentypen Nordex N-117 Gamma und Delta wurden in der 3d-Modellierungs Software Blender<sup>14</sup> nachgebildet und in Unreal Engine unter Berücksichtigung von Anlagenkenndaten aus Herstellerangaben über meteorologische Parameter animiert. Punktschallquellen an Blattspitzen und Blatt Hinterkanten wurden mittels der analysierten Signalcharakteristiken simuliert.

Ein generalisiertes Wind-Anlagen Modell wurde als Unreal-Engine Plugin realisiert<sup>15</sup>.

*AP 1d Untersuchung geeigneter Verfahren für die Nachbildung der realen visuellen Umgebung für verschiedene Plattformen (quasi-mobile Virtual-Reality Technik / mobile Virtual-Reality Technik).*

Zur Nachbildung der realen, visuellen Umgebung eines Windparks wurden öffentliche Geo-Daten eingesetzt. Das Unreal Engine GeoReference Plugin<sup>16</sup> übernimmt die Abbildung von Geo-Koordinaten auf ein kartesischen 3D-Koordinatensystem. Auf dieser Basis können dann verschiedene Geo-Datenformate direkt importiert und in visuelle Geometrie umgewandelt werden<sup>17</sup>. Weitere Geo-Daten definieren Boden-Texturen und Vegetation.

---

<sup>13</sup> <https://www.unrealengine.com>

<sup>14</sup> <https://www.blender.org/>

<sup>15</sup> <https://github.com/iwer/XeeWindturbine>

<sup>16</sup> <https://github.com/iwer/GeoReference>

<sup>17</sup> <https://github.com/iwer/GeotiffLandscape>, <https://github.com/iwer/SpatialGeometryTools>,  
<https://github.com/iwer/ShpGeometry>, <https://github.com/iwer/OSMDataAssets>

#### *AP 1e Entwurf mit Interaktions- und Navigationskonzept für ein MAVR-WEA-System*

Zur Interaktion in VR wurde ein Kontroller gebundenes Kreismenu entwickelt, mit dem atmosphärische Größen manipuliert werden können. Das Navigationskonzept kombiniert kontinuierliche Bewegung mit Teleportation.

#### *AP 1f Entwicklung von Prototypen für MAVR-WEA*

Ein Prototyp des Curslacker Windparks bildet sowohl die visuelle als auch die akustische Umgebung nach und simuliert das Verhalten der Windenergieanlagen unter variablen atmosphärischen Größen.

#### *AP 2b Spezifikation geeigneter Hard-und Software (AR)*

Für die MAAR Lösung wurde ein leistungsstarkes Android – Tablet beschafft.

#### *AP 2c 3D Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physikalischen Eigenschaften im Betrieb*

Hier wurden keine zusätzlichen Arbeiten zu AP 1c unternommen. Das in dem AP entwickelte Modell kommt in beiden Umgebungen im Einsatz.

#### *AP 2d Entwurf mit einem Gesten-basierten Interaktions-Konzepts für ein MAAR-WEA-System*

Auf Basis des AP 2c wurde das MAAR-WEA-System auf der identischen Code-Basis des MAVR-Systems mit einem Unreal-Engine Plugin für Android realisiert. Das Interaktionskonzept verwendet 2D Bedienungselemente und Touchscreen Interaktion.

#### *AP 2e Entwicklung von Prototypen für MAAR-WEA*

Ein Konzept zur Konfiguration eines beliebigen Windparks aus vorhandenen WEA-Modellen in der lokalen Umgebung über eine Kartenansicht wurde erarbeitet. Es erfolgte das Rendern der animierten 3D Modelle vor transparentem Hintergrund und eine Simulation des Direktschalls der WEA zum Benutzer.

Dabei traten folgende Probleme auf:

- Die virtuelle Welt hat keine Kenntnis über Geometrie der realen Welt. Dadurch lässt sich in AR nur Direktschall simulieren.
- Mischung der akustischen virtuellen und realen Welt. Erfordert spezielle Kopfhörer die „akustisch transparent“ sind. Hier gibt es noch keine marktreifen Lösungen.

## II Schlussbericht – Eingehende Darstellung

### 2 Sachbericht – detaillierte Beschreibung der Arbeitspakte im Projekt X-Eptanxe Explore

#### 2.1 AP 1a Definition der Schnittstelle zu Messungen im Rahmen von X-Eptance Impulse

Da die Geräuschanalyse in X-Eptance Impulse (XEI) nicht realisiert werden konnte, konnte keine technische Schnittstelle definiert werden. Statt auf räumliche Aufnahmen zu setzen wurde entschieden, das räumliche Schallfeld (Abb. 5) aus einzelner Schallquellen nach räumlicher Audio-Methodik (Abb. 6) zu synthetisieren. Dazu wurden die Messungen aus XEI gemeinsam untersucht, um distinkte Geräuscherzeuger zu verorten und zu charakterisieren. Dabei wurden von XEI die Analyse der Messungen sowie die aerodynamischen Prinzipien der Schallursachen eingebracht, während XEE die nötigen Parameter für eine Auralisierung einbrachte, die durch die Charakterisierung bestimmt werden mussten. Es wurden Abhängigkeiten zwischen Windgeschwindigkeit, Rotordrehzahl und Geräuschentwicklung geklärt und Entwürfe für die Nachbildung diskutiert.

Dabei haben sich das Blattspitzengeräusch sowie das Blatt-Hinterkanten-Geräusch als die dominanten Geräuschquellen im hörbaren Bereich herausgestellt. Infraschall Geräusche wie die, die beim Blattdurchgang am Turm entstehen, können nicht über den hörbaren Bereich abgebildet werden und werden daher nicht in der Auralisierung berücksichtigt. Zusätzlich werden die Belüftungsgeräusche des Maschinenhauses sowie die der Azimut Motoren nachgebildet.

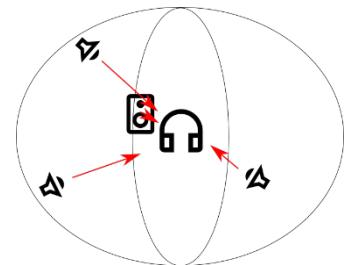


Abbildung 4: Schematische Darstellung räumliches Schallfeld

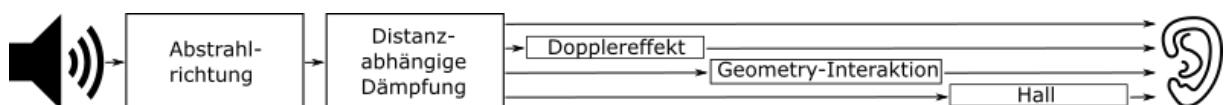


Abbildung 5: Pipeline zur Simulation von akustischen Ausbreitungseffekten

#### 2.2 AP 1b Spezifikation geeigneter Hard- und Software (VR)

Für die verschiedenen geplanten Applikationen sind Game-Engines oft gut aufgestellt, da sie in der Regel eine breite Plattformunterstützung erzielen. Hier unterscheiden sich die Marktführer kaum.

Unterstützung für verschiedene Betriebssysteme, Mobilgeräte, VR- und AR- Hardware ist meist vorhanden oder per Plugin erweiterbar. Auch die Unterstützung von räumlichem Audio ist inzwischen mannigfaltig vorhanden.

Für das Projekt wurde die *Unreal Engine 4* als Basis ausgewählt, da sie zum Zeitpunkt des Projektstarts die eindeutig realistischere Grafik bereitstellte. Als Audio Engine für räumliche Klangsimulation wurde *Steam Audio* gewählt. Damit ist Echtzeit-Schallpropagierung unter Berücksichtigung der visuellen Geometrie mit Verdeckung, Reflektion und Dämpfung zusammen mit binauraler Kopfhörer Ausgabe über Head-Related-Transfer-Functions (HRTF) möglich. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl war die Nachvollziehbarkeit der wissenschaftlichen Grundlage dieser Engine, die auf Chandak [13] basiert.

Die Opensource Softwarebibliothek „*Geospatial Data Abstraction Library*“ (GDAL)<sup>18</sup> wurde für die Integration von Geodaten ausgewählt. Mit einem Unreal-Engine Plugin<sup>19</sup> kann diese Bibliothek in der Game-Engine verwendet werden.

Daraus leitet sich folgende Hardware ab:

Entwicklungsrechner

- Quad Core Intel/AMD Prozessor >=2.5GHz
- 32GB RAM
- GPU: NVIDIA GeForce >= 470 GTX / AMD Radeon >= 6870 HD

VR-System:

- HTC Vive (vorhanden) zur Entwicklung
- Valve Index für den Prototypen (beschafft)

Mobiles Gerät:

- Aktuelles Flagship Android Gerät (Samsung Galaxy S8 vorhanden)
- Samsung Galaxy Tab S7+ Tablet (beschafft)

## 2.3 AP 1c 3D-Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physischen Eigenschaften im Betrieb

Für das Projekt wurde ein 3D Modell des WEA Typs *Nordex 117 Gamma* in der 3D-Modellierungssoftware *Blender* erstellt. Dabei wurden die WEA Komponenten Turm, Eingang,

---

<sup>18</sup> <https://gdal.org/>

<sup>19</sup> <https://github.com/TensorWorks/UnrealGDAL>

Maschinenhaus, Rotorkopf und Rotorblatt einzeln modelliert, so dass sie in der Game Engine animiert werden können.

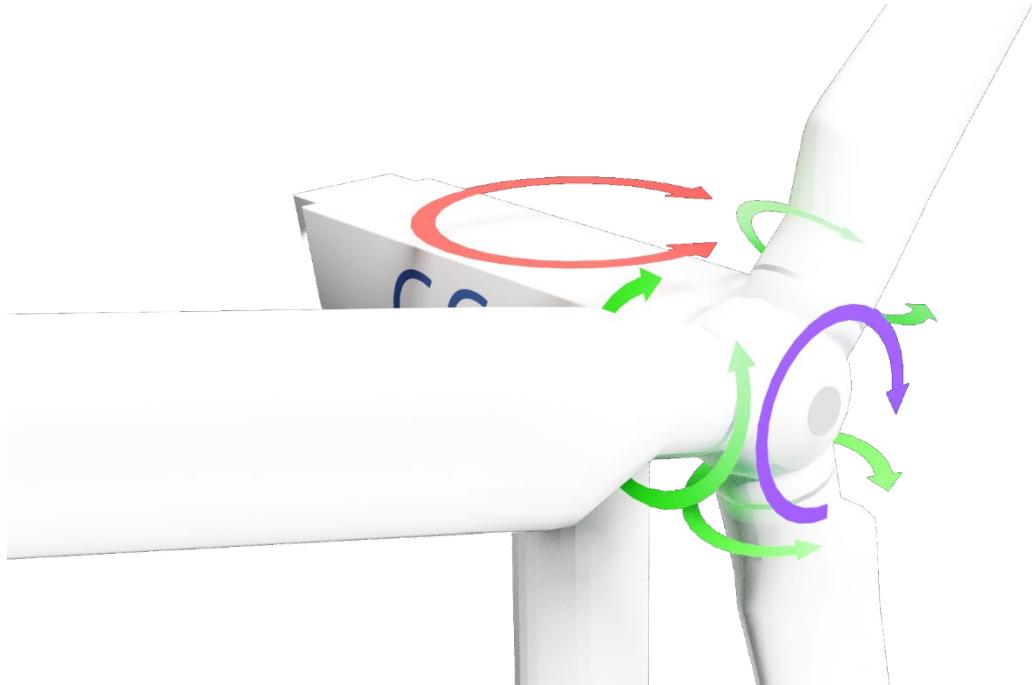


Abbildung 6 Animation des WEA Modells. Blau: Rotation, Grün: Blattpitch, Rot: Azimut

Das Verhaltensmodell ist darauf ausgelegt über die Parameter Windgeschwindigkeit und Windrichtung gesteuert zu werden. Aus den Messdaten des Windparks wurde eine typische Drehzahlkurve in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit definiert. Abhängig von der Drehzahl und der Windgeschwindigkeit wird die Anströmrichtung an der Blattspitze bestimmt, die dann gemeinsam mit dem gewünschten Anströmwinkel den Pitch der Rotorblätter bestimmt. Weicht die Windrichtung mehr als eine Toleranz vom aktuellen Azimut Winkel des Maschinenhauses ab, wird die Ausrichtung der WEA korrigiert. Bei Nacht werden die Warnleuchten der WEA aktiviert und blinken im üblichen Muster.

## **2.4 AP 1c.1 (Neu durch Änderungsantrag) Erstellen eines parametrischen Synthese-Modells für die Haupt-Geräuschquellen einer WEA für die dynamische Modulation durch Umgebungsbedingungen**

Für die Geräuscherzeugung werden Punktschallquellen auf das geometrische Modell der WEA platziert, die entweder synthetisiert oder aus Audiosamples gemischt werden. Jede Punktschallquelle hat eine Ausbreitungsform und Parameter, die definieren, wie stark das

Geräusch über die Entfernung gedämpft wird und wie es sich verändert, wenn der Verursacher verdeckt ist.

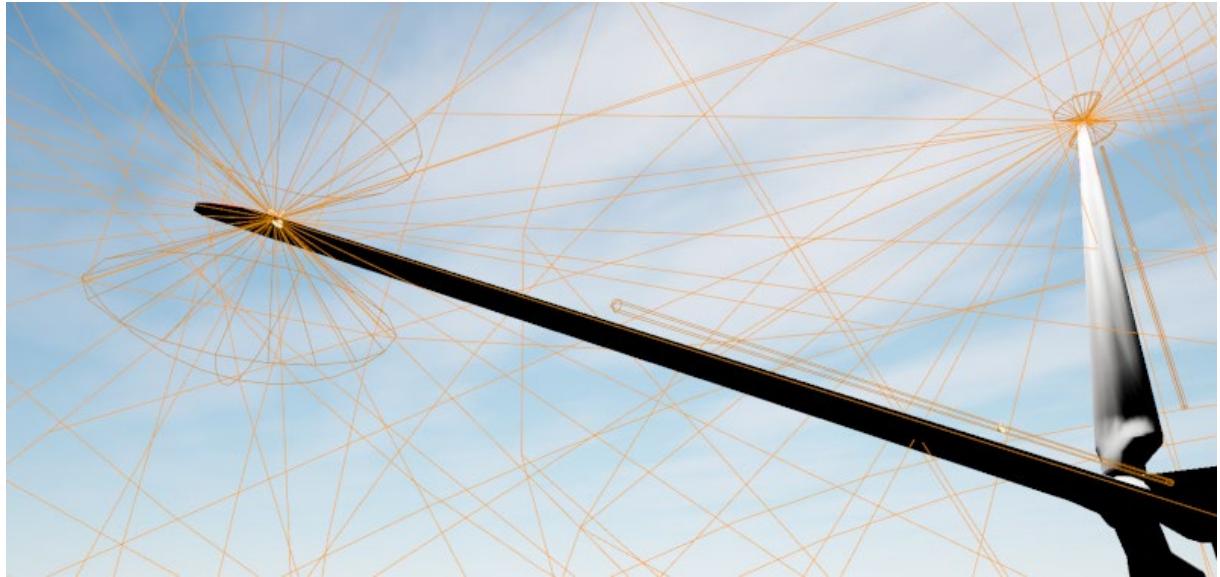


Abbildung 7: Punktschallquellen am WEA Blatt. Kegelförmige Ausbreitung des Blattspitzengeräusches, Zylinderförmige Ausbreitung von der Blatt Hinterkante.

Mit einer virtuellen Messung des Abstandes von Schallerzeugungsorten zur Hörer\*in konnte gezeigt werden, dass die Variationen des gemessenen Schalls neben den offensichtlichen variablen Umdrehungsgeschwindigkeit im Wesentlichen auf den Dopplereffekt zurückzuführen sind. Die signifikante Geschwindigkeit der Blattspitzen relativ zu einer Position am Boden kann sowohl den Verlauf als auch die Höhe der Frequenzverschiebung des Blattspitzengeräusches erklären. Es lässt sich schließen, dass das Blattspitzengeräusch am Ursprung ein kontinuierliches Geräusch ist, das nicht zur Laufzeit moduliert werden muss.

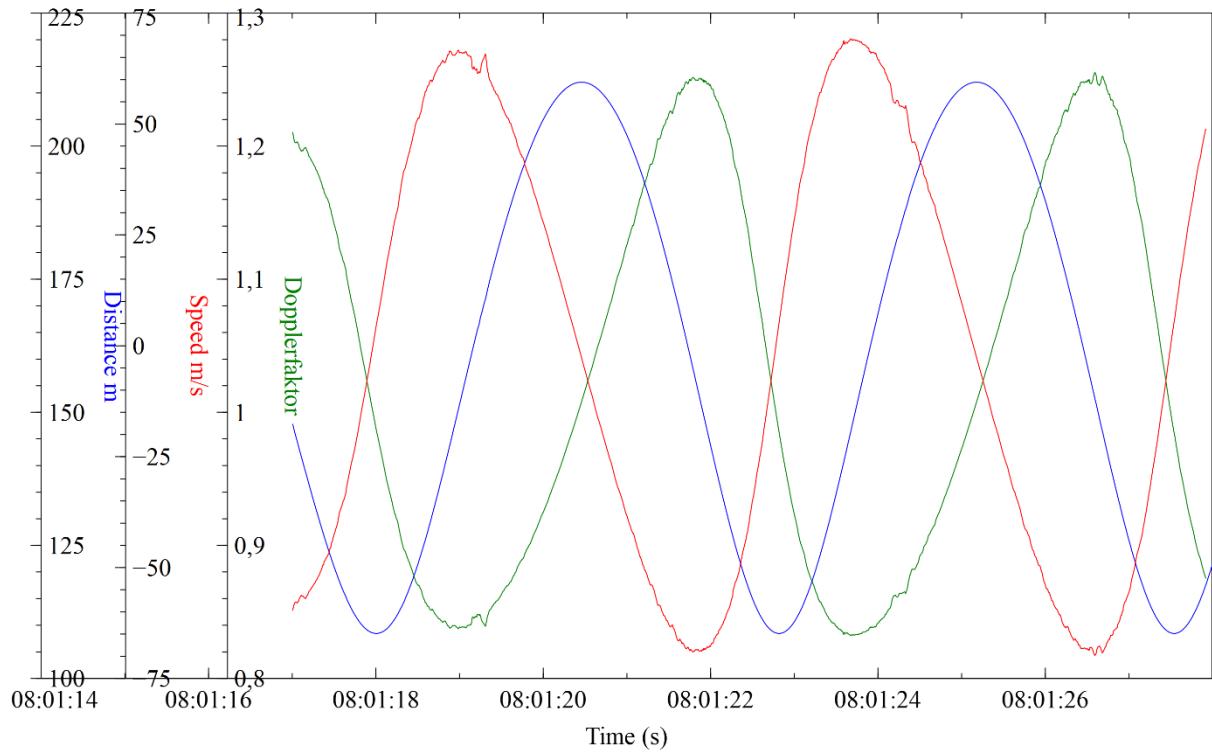


Abbildung 8: Ableitung eines theoretischen Faktors für die Frequenz-verschiebung durch den Dopplereffekt aus der gemessenen Distanz zwischen einer WEA-Blattspitze und einer Hörer\*in am Boden in der virtuellen Umgebung (Diskontinuitäten resultieren aus Rundungsfehlern von Positionen in Fließkommazahlen einfacher Präzision).

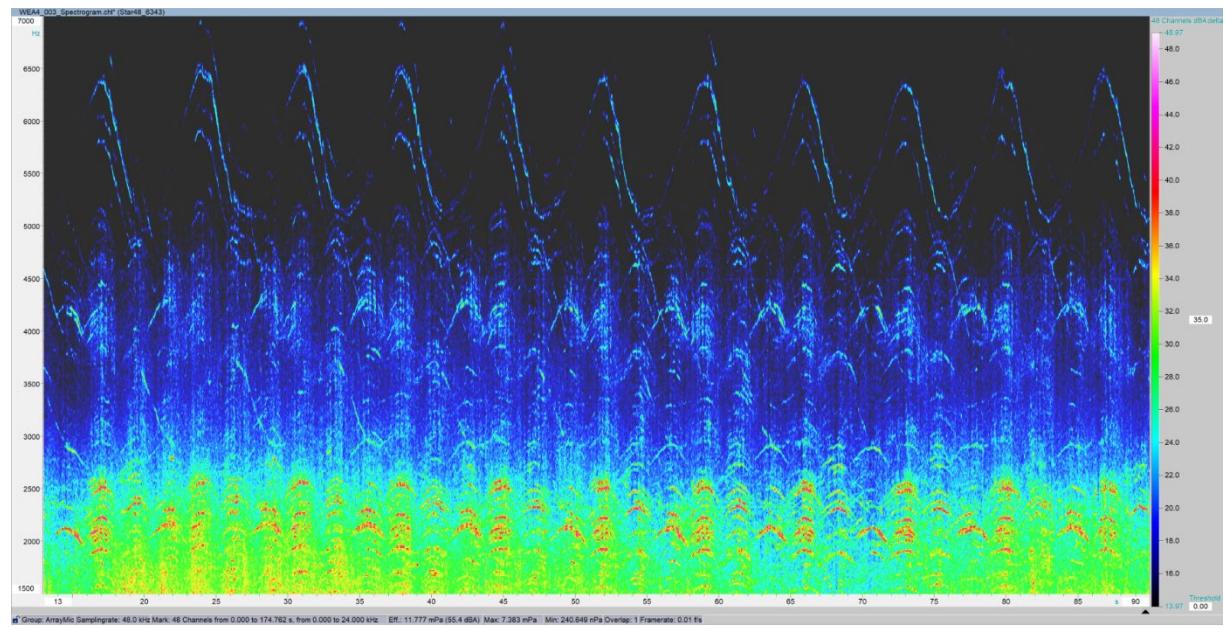


Abbildung 9: Wasserfall-Diagramm einer Aufnahme einer WEA im Betrieb aus dem X-Eptance Impulse Projekt. Die leicht nach vorne geneigte Charakteristik der tonalen Anteile lässt sich durch den Dopplerfaktor erklären.

Zusätzlich zu den WEAs wurden Umgebungsgeräusche modelliert, um einen akustischen Hintergrund zu erhalten. Als wichtige, identifizierbare Geräuschquelle wurden Fahrzeuge auf den nahen Straßen identifiziert. Fahrzeugmodelle werden in der Umgebung entlang Spline-Kurven animiert und emittieren mit Dopplereffekt belegte Fahrgeräusche. Weitere Umgebungsgeräusche werden zufällig um die Benutzer\*in herum erzeugt. Bei der Erzeugung wird der Bodentyp der Landschaft (vgl. AP 1d) am Ort des Geräusches abgefragt und ein Geräusch aus einer entsprechenden Liste abgespielt. So kann um die Benutzer\*in herum der Eindruck einer reichen Klanglandschaft entstehen und gleichzeitig der Rechenaufwand möglichst gering gehalten werden. Dieses Vorgehen ist motiviert durch Praktiken aus der Produktion von Audio für Computerspiele.

Für die Simulation der Ausbreitung von den Schallquellen zum Empfänger werden verschiedene Ausbreitungseffekte definiert. Ausgehend von der Schallquelle wird das Audiosignal in Richtung des Empfängers in Abhängigkeit der Strahlungsform (sphärisch, zylindrisch, kegelig) gedämpft. Im nächsten Schritt wird eine entfernungsabhängige Dämpfung abgetragen, die den Energieverlust einer sich kugelförmig ausbreitenden Welle simuliert. Zusätzlich werden höhere Frequenzen durch einen entfernungsabhängigen Tiefpass-Filter stärker gedämpft als niedrige Frequenzen um Luftdämpfung zu simulieren. Ist die Schallquelle aus Sicht des Empfängers verdeckt wird zusätzlich eine starke Dämpfung auf das Signal gelegt

## **2.5 AP 1d Untersuchung geeigneter Verfahren für die Nachbildung der realen visuellen Umgebung für verschiedene Plattformen (quasi-mobile Virtual-Reality Technik / mobile Virtual-Reality Technik).**

360° Videoaufnahmen eignen sich nicht für eine 3D Rekonstruktion der Umgebung. Sie bieten zwar die Möglichkeit stationärer, fotorealistischer Perspektiven, benötigen aber eine überdurchschnittlich gute Auflösung, da in der VR-Sicht immer nur ein Ausschnitt sichtbar ist. Bei Full-HD Auflösung ( $1920 \times 1080$ ) des 360° Videos entspricht das Sichtfenster eher einer Auflösung von 640p( $640 \times 480$ ). Cranmer et.al. [14] verwendeten in einer ähnlichen Untersuchung zusammengesetzte Videos mit 8K Auflösung ( $7680 \times 3840$ ).

Eine Rekonstruktion durch Fotogrammetrie ist zwar denkbar, aber vor allem im Aufwand der Datenbeschaffung nicht angemessen. Viel eher eignen sich regelmäßig durch Arial-Laserscanning erfasste und im Geoportal der Stadt Hamburg veröffentlichte Geodaten hervorragend zur Gelände Rekonstruktion. Die Rekonstruktion der Umgebung durch Geodaten wurde auch in anderen ähnlichen Untersuchungen gewählt [10] [15] [16] [17] [18].

Dazu wurden zwei Unreal Engine Plugins entwickelt, die zum einen erlauben, Positionen in Geo-Koordinaten auszudrücken und zum anderen Dateien im Geotiff Format zu importieren, welches ein weit verbreitetes Austauschformat für georeferenzierte Rasterdaten ist.

Im Projekt kommen dann Daten aus dem digitalen Geländemodell Hamburg (DGM1, Datenlizenz Deutschland Namensnennung 2.0)<sup>20</sup> zum Einsatz. Die Daten zeichnen sich durch eine hohe Auflösung und durch ihre Aktualität aus. Die georeferenzierten Daten erlauben eine präzise Positionierung von Objekten an Geo-Koordinaten, so dass sie im kartesischen Koordinatensystem der Game Engine an der richtigen Stelle stehen. Um das Geländemodell zu texturieren und mit Vegetation zu versehen, wurden verschiedene Geodaten Quellen für Bodenbedeckungsklassifizierung in Betracht gezogen. Hier wurde das Zwischenergebnis des Klassifizierungsprojekts *S2GLC* [19] verwendet, welches 15 verschiedene Bodentypen beschreibt. Diese Klassifizierung bestimmt, wie das Gelände texturiert wird und welche Arten von Vegetation auf diesem Bodentyp wachsen.

Zur Generierung von Wasserflächen in Gräben und Wasserläufen wurde auf den Datensatz „INSPIRE HH Hydro-Physische Gewässer ALKIS“<sup>21</sup> zurückgegriffen. Mittels eines Importers werden Polygone aus ESRI Shape-Dateien extrahiert, um mit Hilfe der Georeferenzierung Drahtgitter-Modelle mit Wassertextur zu erzeugen. Für Gebäudegrundrisse wurde auf Openstreetmaps Daten zurückgegriffen, um Gebäudeprototypen aus Grundrissen zu erzeugen.



Abbildung 10: Gegenüberstellung der rekonstruierten Umgebung (links) und einem Satellitenbild (rechts, Google Maps).

<sup>20</sup> <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuuid=A39B4E86-15E2-4BF7-BA82-66F9913D5640>

<sup>21</sup> <https://metaver.de/trefferanzeige?docuuuid=9D3B1102-441C-4E94-A7D3-6CFDB8F13E54>

Je nachdem wie leistungsstark die Plattform ist, werden dann beim Erstellen des Programms mehr oder weniger detaillierte Geometrie und mehr oder weniger hochauflöste Texturen auf das Endgerät ausgeliefert. Diese Funktionalität ist Teil der Game Engine, um die Entwicklung von der Plattform zu entkoppeln.

## **2.6 AP 1e Entwurf mit Interaktions- und Navigations-Konzept für ein MAVR-WEA-System.**

Da die größten Hersteller im Q4/2019 die Weiterentwicklung und Unterstützung ihrer Mobile-VR Basisdienste aufgrund geringer Nachfrage bis auf weiteres einstellten wurde entschieden, eine quasi-mobile Lösung auf Basis möglichst mobiler, aber leistungsstarker Hardware zu realisieren.

Über das Headtracking der VR Hardware ist die Kopfposition und -Neigung bereits in der Audio Engine mit der HRTF Filterung gekoppelt. Durch die Entscheidung, freie Bewegung zu erlauben und die Fähigkeit der Audio Engine, Schall emittierende Quellen zur Laufzeit für beliebige Hörer\*innenpositionen zu rendern, ist es unnötig, sich auf einzelne Messpunkte oder festgelegte Pfade zu beschränken.

Zur Navigation in VR wurden einige Abschlussarbeiten herangezogen, die verschiedene Navigationskonzepte in Nutzerstudien evaluiert haben. Hier ist insbesondere die vergleichende Arbeit von Dimitri Meier [20] aufschlussreich, in der verschiedene Navigationsarten im Innenraum eines VR-Passagierflugzeuges untersucht wurden. Hier stellte sich für die Fortbewegung über größere Strecken das „Teleportieren“ als bevorzugt heraus. Tim Beier [21] machte mit Kurzstrecken-navigation über einen Joystick oder ein Touchpad gute Erfahrungen, um Teleportationen zu vermeiden. Diese Methode würde sich auch für die Kurzstreckennavigation im freien Feld gut eignen. Eine weitere denkbare Möglichkeit wäre analog zu der Arbeit von Jan Menzel [22] den Benutzer auf eine virtuelle Plattform zu stellen auf der er sich durch das VR-Tracking frei bewegen kann und die er durch virtuelle Steuerungselemente durch die Welt bewegen kann. So bleibt der „feste Boden unter den Füßen“ auch in der virtuellen Welt ein konsistentes Erlebnis.

In VR bieten sich zwei Klassen von Interaktionskonzept an. Die Interaktion mit dreidimensionalen Objekten, wie Hebeln oder Schaltern, die in VR platziert sind, erlaubt eine recht natürliche Interaktion. Kontexte in denen solche Bedienelemente plausibel sind wie zum Beispiel das Markieren von gefundenen Objekten durch Berühren [21] oder das Verfahren eines Leitstandes durch virtuelle Fußschalter [22] erreichen oft einen hohen Grad an Immersion. Die andere Klasse ist die Interaktion über relativ zu den Benutzenden eingeblendete 2D Oberflächen deren Steuerelemente in VR betätigt werden können [23] [24]. Hierbei hat sich das Konzept bewährt, die

dominante Hand zur Bedienung der Oberfläche zu verwenden, die relativ zur nicht-dominaten Hand eingeblendet wird.

Die interaktiven Elemente kontrollieren in diesem Projekt hauptsächlich meteorologische Parameter wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung etc. und Tages- wie Jahreszeit. Für Parameter dieser Art ist eine Steuerung über dreidimensionale Bedienelemente zwar denkbar, bringt aber keinen immersiven Mehrwert durch kontextuell logischen Zusammenhang. Daher werden diese Parameter über eine 2D Benutzeroberfläche, die an der nicht-dominanten Hand eingeblendet werden kann, gesteuert. Es bietet sich an, hier eine hierarchische Kreismenüstruktur zur Auswahl des zu steuernden Parameters vorzusehen, in dessen zweiten Ebene dann numerische Werte mit Slidern verändert werden können.

Das Navigationskonzept wurde mit Hilfe studentischer Hilfskräfte umgesetzt. Die Blickrichtung der Benutzer\*Innen wird komplett über das VR-Headset getrackt und er kann sich in begrenztem Rahmen frei bewegen. Die Grenzen der Bewegungsfreiheit werden dabei visualisiert, wenn man ihnen nahekommt. Die Benutzer\*In hat einen VR Controller für jede Hand, die Funktionen zur Bewegung, ein Menü zu Parametermanipulation sowie ein Infopanel, um mit der Umgebung zu interagieren. Zur Fortbewegung kann der Benutzer entweder analog einem Spaziergang sich kontinuierlich in Richtung des Controllers oder der Blickrichtung bewegen oder aber sich an einen durch eine Wurfparabel visualisierten, weiter entfernten Ort teleportieren.

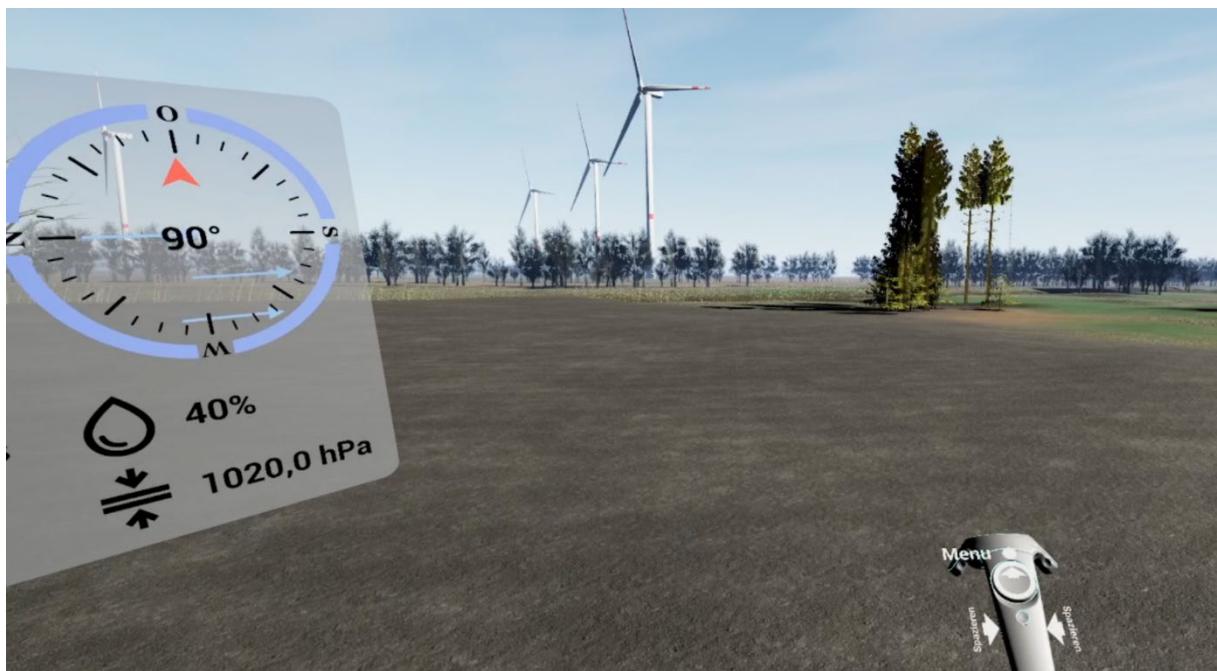


Abbildung 11: Kontinuierliche Bewegung in Richtung des Controllers oder in Blickrichtung.

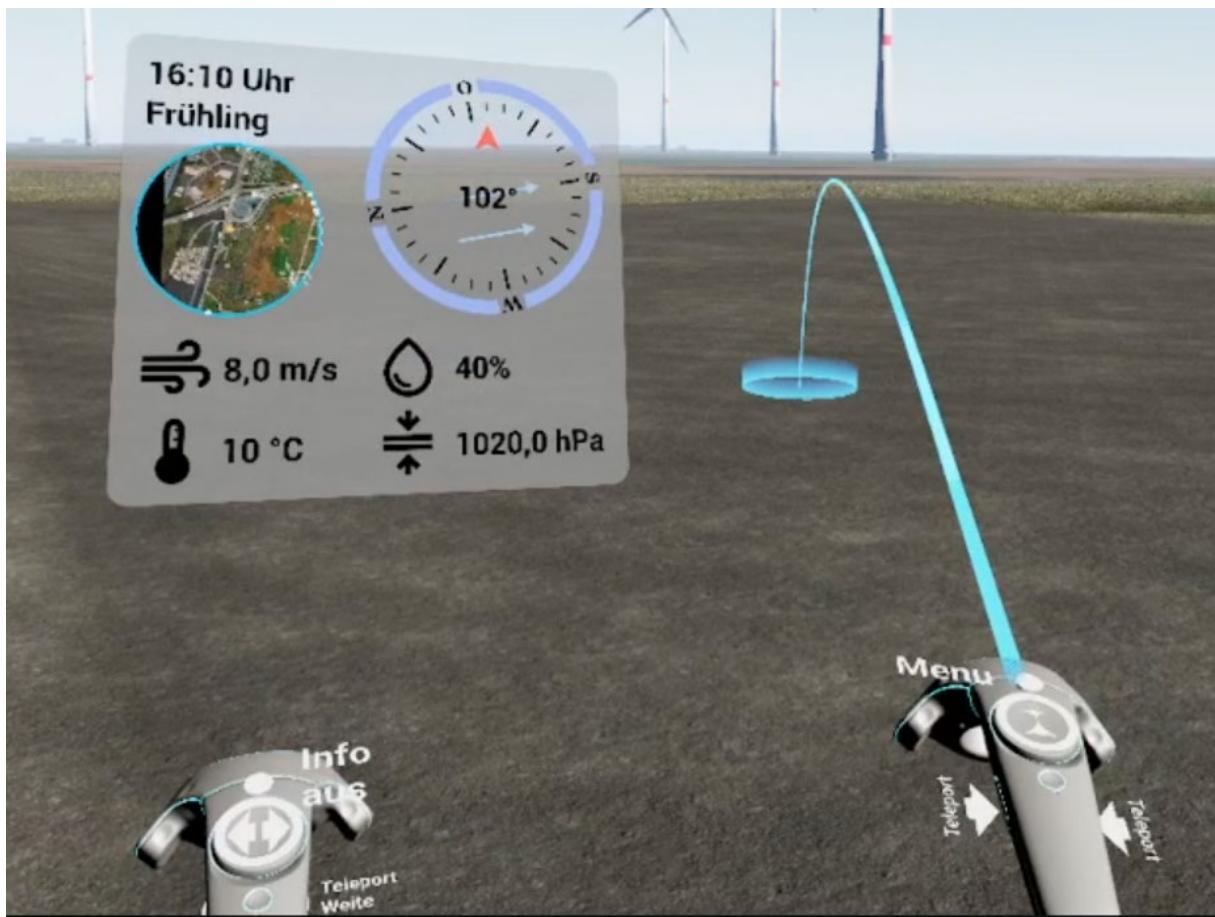


Abbildung 12: Teleportation an einen weiter entfernten Ort. Links Infotafel mit Umgebungsinformationen.



Abbildung 13: Kreismenü zur Manipulation von Tageszeit und Jahreszeit (Icon defekt).

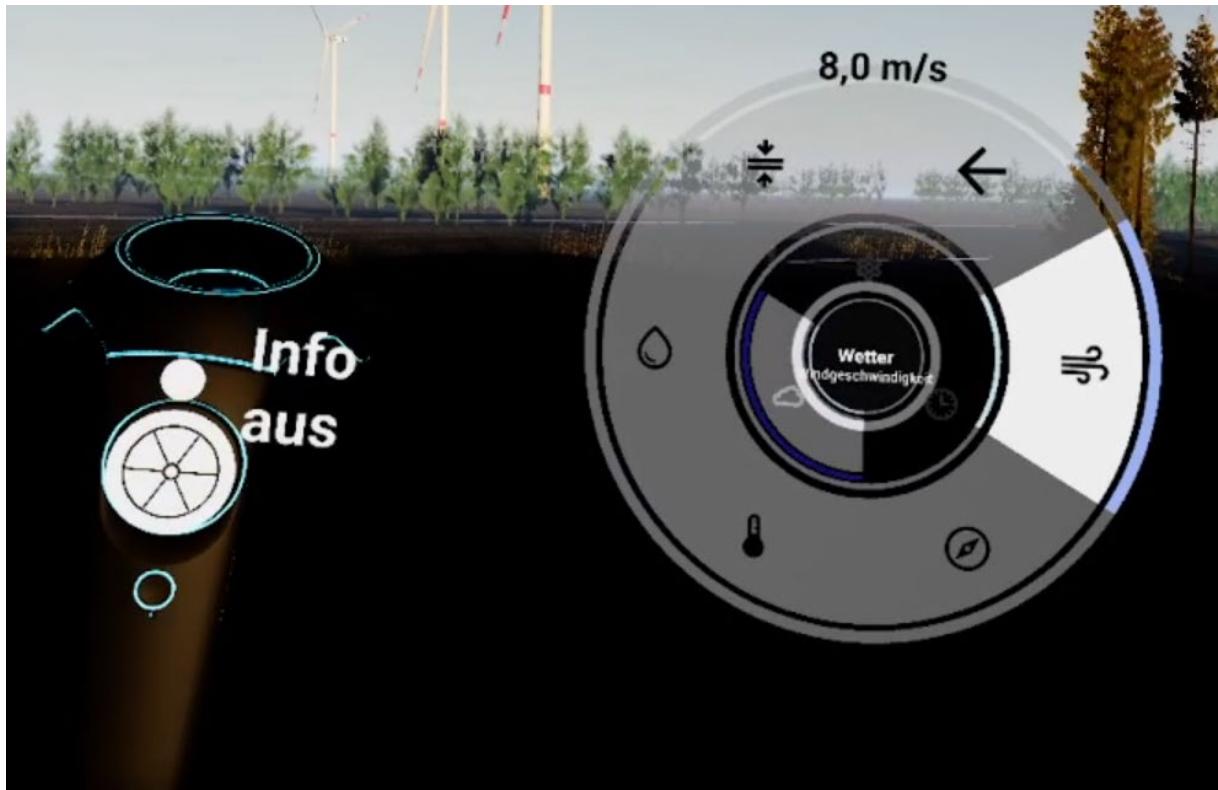


Abbildung 14: Kreismenü zur Manipulation von Windgeschwindigkeit, -richtung, Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck.

## 2.7 AP 1f Entwicklung von Prototypen für MAVR-WEA

Auf Basis des DGM1 wurde ein 4km<sup>2</sup> großes Areal um den Windpark Curslack als Landschaftsgeometrie in der Engine rekonstruiert. Texturen für die verschiedenen Landschaftsklassen sowie Vegetation wurden ausgewählt. Hier wurde auf kostenlose Assets aus dem Unreal Marketplace sowie Creative-Commons lizenziertes Material zurückgegriffen. Nach Möglichkeit wurde Vegetation verwendet, die eine simulierte, von der Windstärken abhängige Reaktion erlaubt.

Die nachgebildete WEA wurde an den Geolokationen der 5 in Curslack stehenden WEAs platziert. 3D Modelle für den Windmessmast sowie die großen Strommaste wurden erstellt und ebenfalls geolokalisiert platziert.

Für die ambiente Geräuschkulisse wurden Fahrzeuge hinzugefügt, die eine nahe Autobahn entlangfahren und Geräusche von sich geben. Weiterhin wurde verschiedene weitere Geräuschquellen aus der Umgebung wie Wiesenvögel und Windrauschen hinzugefügt.

Der Prototyp ist aus First-Person Perspektive am Bildschirm lauffähig und kann über Maus und Tastatur gesteuert. Die Anbindung an das VR Endgerät und die Tests sind abgeschlossen.

## **2.8 AP 2a Definition der Schnittstelle zu Messungen im Rahmen von X-Eptance Impulse**

Wie AP 1a. Hier nur aus Gründen der Vollständigkeit nochmals aufgeführt. Vgl. Ausführungen zu AP 1a.

## **2.9 AP 2b Spezifikation geeigneter Hard- und Software (AR)**

Die Software für die Entwicklung der AR-Umgebung ist abgesehen von der Hardwareabstraktion identisch mit der für die VR-Umgebung.

Die ursprünglich vorgesehene Microsoft HoloLens als AR-Head-Mounted-Display stellte sich in mehreren Aspekten als Enttäuschung heraus. Zum einen deckt das Display nicht einmal annähernd das Gesichtsfeld ab, was den Eindruck eines vor sich her getragenen Bildschirms erweckt. Zum anderen sind die Projektionen auf die halbtransparente Brille der Lichtstärke des natürlichen Lichtes im Außen Einsatz nicht gewachsen.

Eine Alternative könnte das sogenannte Video-See-Through verwendet werden, bei dem ein Kamerabild verwendet wird, welches mit virtuellen Inhalten ergänzt über einen Bildschirm ausgegeben wird. Um hierbei den Rechenaufwand auf dem mobilen Endgerät gering zu halten wird untersucht, ob serverseitiges Rendern der visuellen und akustischen, virtuellen Inhalte und anschließendes Überlagern des Kamerabildes auf dem Endgerät eine plausible Lösung bietet. Für das MAAR-WEA-System wurde ein Samsung Galaxy Tab S7+ beschafft. Die Untersuchung von Cloud-Rendering Technologien wurde in das Folgeprojekt „Open Citizen Soundwalks“ verlagert.

## **2.10 AP 2c 3D Nachbildung einer WEA-Anlage mit Simulation der physikalischen Eigenschaften im Betrieb**

Für die AR Anwendung wurde keine gesonderte Modellierung vorgenommen, da das Modell Plattformunabhängig für VR und AR entwickelt wurde (Siehe AP 1c).

## **2.11 AP 2d Entwurf mit einem Gesten-basierten Interaktions-Konzepts für ein MAAR-WEA-System**

In dem MAAR-WEA-System wird das 3D Modell sowie das Verhalten der Anlage visuell wie auch akustisch durch die für die VR-Umgebung entwickelten Codebasis mittels eines Android Plugins für Unreal-Engine Anwendungen realisiert. Hierbei sind lediglich die WEA-Modelle von Relevanz, da in Augmented-Reality die Umgebung nicht virtuell dargestellt wird.

Für die Interaktion in AR bietet sich die Einblendung von Bedienoberflächen relativ zum Blickfeld der Benutzer\*in an. Da das Sichtfeld in AR-HMDs oftmals sehr begrenzt ist fällt es schwer, einen Überblick über den virtuellen Raum zu bekommen. Dreidimensionale Elemente, die im virtuellen Raum platziert sind, sind also schwerer aufzufinden. Das Einblenden virtueller Bedienelemente vor den Augen hingegen wird von den meisten Benutzer\*innen als intuitiv und in kürzester Zeit nachvollziehbar empfunden [25].

Im Falle der Video-See-Through Lösung müsste allerdings klassische Interaktion über den Touchscreen verwendet werden, da Mobilgeräte in der Regel keine Möglichkeit haben Gesten zu erkennen.

## 2.12 AP 2e Entwicklung von Prototypen für MAAR-WEA

Eine mobile Anwendung wurde als Video-See-Through Lösung mit Unterstützung studentischer Hilfskräfte konzeptioniert und umgesetzt. In der Konzeption sollte eine Benutzer\*in über eine Karte seiner lokalen Umgebung Standorte von WEAs per Touch bestimmen und sich diese Konfiguration anschließend im AR-Modus ansehen/anhören können. Um eine realistische Entfernung der WEAs zu gewährleisten, sollte wie in VR auf Georeferenzierung zurückgegriffen werden.

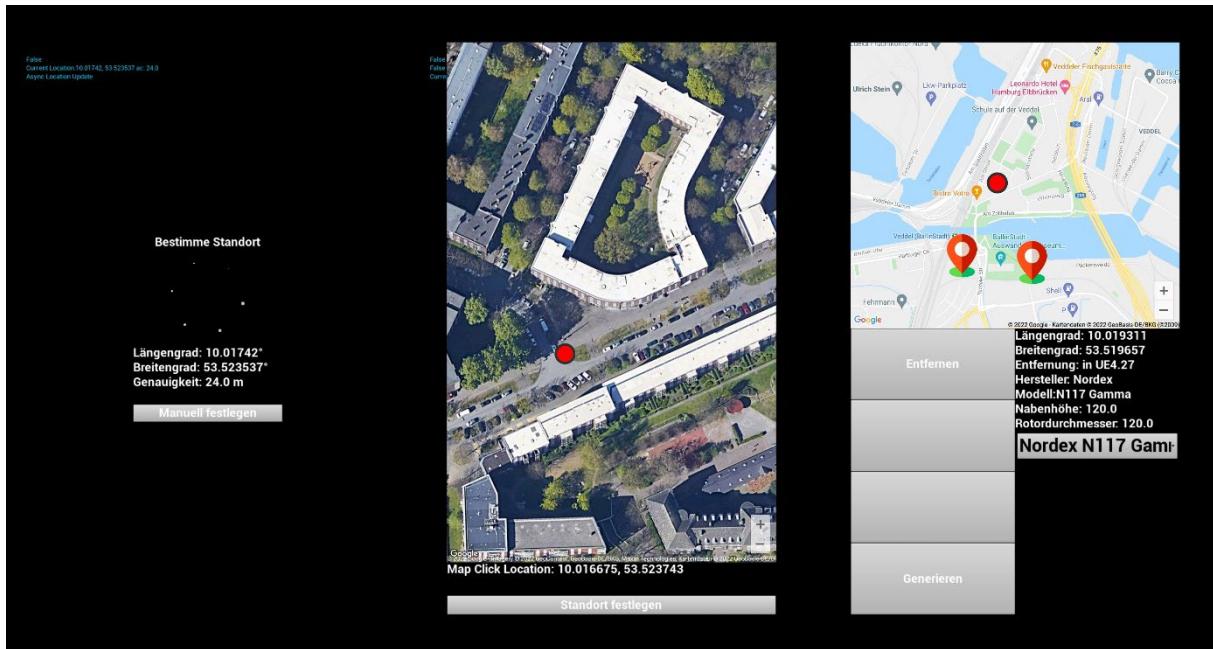


Abbildung 15: Konzept für geolokalisierte Aufstellung eines virtuellen Windparks v.l.n.r: Automatische Positionsbestimmung des Benutzers, Manuelle Feinjustierung Standort, Auswahl für Standorte und Typ von WEAs.

Dies stellte sich aber sowohl in der eigenen Implementierung als auch in der Ende Q3/2021 veröffentlichten Implementierung der Unreal-Engine, die die Unterstützung von

Georeferenzierung für Mobilgeräte kurz vor Veröffentlichung zurückzog, als nicht lösbar heraus. Aktuell werden die WEAs relativ zum Standort der Benutzer\*in positioniert. So kann zwar kein virtueller Windpark konfiguriert werden aber dennoch die Geräuschemissionen in variablen Abständen angehört werden. Das 3D Modell der WEA wird dem Kamerabild perspektivisch korrekt überlagert (Abbildung 17).

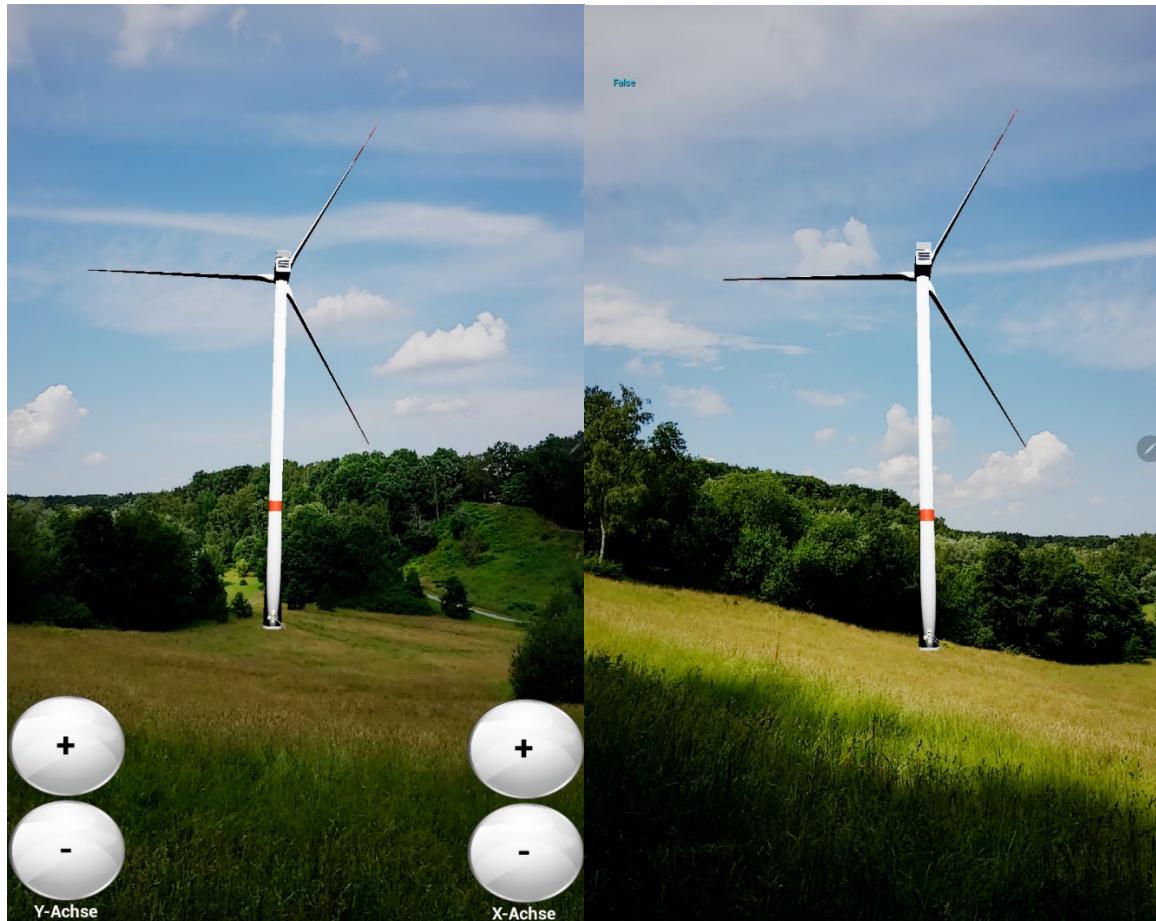


Abbildung 16: Virtuelle WEA als Überlagerung über einem Kamerabild.

Das Interaktionskonzept wurde auf Touch-Oberflächen angepasst und sieht eine Steuerung der Umgebungsparameter Windrichtung und -Geschwindigkeit sowie Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchte vor. Außerdem kann die Benutzer\*in den Abstand zur Anlage variieren, um entfernungsbedingte akustische Effekte zu erleben.

### 3 Fazit

Für die MAVR Lösung kann insgesamt ein positives Fazit gezogen werden. Die Erstellung der visuellen Umgebung und Geometrie gestaltet sich weitgehend problemlos und es kann auf etablierte Methoden und Softwarebibliotheken zurückgegriffen werden. Die steigende Verfügbarkeit von offiziellen Geodaten erleichtert realitätsgetreue Nachbildung real existierender Landschaften. Die akustische Simulation einer frei begehbareren Geräuschsphäre ist dagegen nicht so gut verstanden. Während auch hier bereits viele Softwaretools Unterstützung bieten, ist die Methodik nicht ohne ein fundamentales Verständnis für physikalische Schallausbreitung sowie der verwendeten Audio-Engine verständlich. Das liegt daran, dass Audio in Game-Engines mit einer großen künstlerischen Freiheit verwendet werden, die in der Realität durch physikalische Grenzen eingeschränkt wird. Es scheint jedoch möglich zu sein, die Parameter der Audio-Engine durch physikalische Berechnungen der Schallausbreitung zu generieren und sich so einer physikalisch korrekten Schallausbreitung anzunähern. Ein weiteres Problem ist, dass sich das Signal der Geräuschquellen an den Rotorblättern praktisch nicht ohne Nebengeräusche aufnehmen lässt. Dadurch wird es erforderlich, das Quellsignal synthetisch zu erzeugen. Auch dies ist nur durch eine iterative Approximation zu realisieren, bei der das Quellsignal Stück für Stück modifiziert wird, bis es in einiger Entfernung genauso klingt wie auf Aufnahmen von echten WEAs.

Die MAAR Lösung leidet neben den Problemen bei der virtuellen Audio-Produktion in VR an weiteren Problemen, die zum Teil bekannt oder Gegenstand aktueller Forschung sind. Zum einen ist das AR Positionstracking zusammen mit GPS nicht genau genug, um weit entfernte Objekte visuell stationär erscheinen zu lassen, und erfordert manuelle Kalibrierung ([26], [27]). Je weiter entfernt ein Objekt dargestellt wird, desto größer multiplizieren sich Winkelgenauigkeiten beim Tracking und verursachen eine Bewegung des Objekts vor dem Hintergrund. Das viel größere, noch ungelöste Problem ist das „Mischen“ von virtuell erzeugtem Audio mit der realen Geräuschsphäre. Es gibt Ansätze dieses Problem mit speziellen Kopfhörern zu lösen ([28], [29]), diese leiden jedoch noch unter starken Einschränkungen der Lokalisierbarkeit von entweder virtuellen oder realen Geräuschen [30] und sind deshalb noch nicht für die Anforderungen an eine immersive AR geeignet.

Im Zusammenhang mit der Audiosimulation unter Berücksichtigung der Umgebung steht der MAAR Lösung des Weiteren im Wege, dass die virtuelle Umgebung keine, oder nur rudimentäre Kenntnisse über die reale Umgebung besitzt und somit zunächst nur Direktschall simuliert werden kann. In diesem Zusammenhang existieren Ansätze der visuellen Informationsbeschaffung über die Kamera eines mobilen Gerätes, um so Kenntnis über nahe Oberflächengeometrie und ähnliche

Umgebungsbedingungen zu erlangen [31]. Diese Ansätze befinden sich jedoch noch in der Erforschung.

## Literatur

- [1] A. D. W. a. H. Benko, „Combining multiple depth cameras and projectors for interactions on, above and between surfaces.,“ in *Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '10)*, 2010.
- [2] T. Schoeps, T. Sattler, C. Häne und M. Pollefeys, „3D Modeling on the Go: Interactive 3D Reconstruction of Large-Scale Scenes on Mobile Devices,“ 2015.
- [3] D. Begault, „3-D Sound For Virtual Reality and Multimedia,“ September 2001.
- [4] A. Härmä, J. Jakka, M. Tikander, M. Karjalainen, T. Lokki, J. Hiipakka and G. Lorho, "Augmented Reality Audio for Mobile and Wearable Appliances," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 52, p. 618–639, June 2004.
- [5] B. N. J. Postma und B. F. G. Katz, „Creation and calibration method of acoustical models for historic virtual reality auralizations,“ *Virtual Reality*, Bd. 19, pp. 161-180, 2015.
- [6] M. Vorlaender, D. Schröder, S. Pelzer und F. Wefers, „Virtual Reality for Architectural Acoustics,“ *Journal of Building Performance Simulation*, Bd. 8, January 2015.
- [7] F. Wefers, „Partitioned convolution algorithms for real-time auralization,“ Logos-Verl., Berlin, 2015.
- [8] M. Azevedo, „Production techniques for perceptually realistic soundscape auralization,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 135, p. 2148–2148, 2014.
- [9] S. Harriet and D. T. Murphy, "Auralisation of an Urban Soundscape," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 101, p. 798–810, 1 July 2015.
- [10] M. Manyoky, U. Wissen Hayek, K. Heutschi, R. Pieren und A. Grêt-Regamey, „Developing a GIS-based visual-acoustic 3D simulation for wind farm assessment,“ *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Bd. 3, p. 29–48, 2014.
- [11] A. Papakonstantinou, T. Kontos, E. Christodoulou und N. Soulakellis, „3D Geovisualisation of Noise and Visual impact of a proposed wind farm development using a GIS based visual-acoustic 3D simulation,“ 2013.
- [12] G. A. Dekker, Q. Zhang, J. R. Moreland und C. Q. Zhou, „MARWind : Mobile Augmented Reality Wind Farm Visualization,“ 2013.

- [13] A. Chandak, „Efficient Geometric Sound Propagation Using Visibility Culling,” University of North Carolina at Chapel Hill, USA, 2011.
- [14] A. Cranmer, J. D. Ericson, A. E. Broughel, B. Bernard, E. Robicheaux und M. Podolski, „Worth a thousand words: Presenting wind turbines in virtual reality reveals new opportunities for social acceptance and visualization research,” *Energy Research & Social Science*, Bd. 67, p. 101507, 2020.
- [15] M. Manyoky, U. Wissen Hayek, R. Pieren, K. Heutschi und A. Grêt-Regamey, "Evaluating a visual-acoustic simulation for wind park assessment," *Landscape and Urban Planning*, vol. 153, p. 180–197, 9 2016.
- [16] J. Molina Ruiz, M. L. García-Lorenzo, C. Pérez-Sirvent, M. J. Martínez-Sánchez und D. Gallego, "Assessment of the Acoustic Impact of Wind Farm Projects: Methodology and Case," *Journal of Geoscience and Environment Protection*, vol. 06, p. 99–110, 2018.
- [17] A. Rafiee, P. Van der Male, E. Dias und H. Scholten, "Developing a wind turbine planning platform: Integration of “sound propagation model–GIS-game engine\_? triplet,”" *Environmental Modelling & Software*, vol. 95, p. 326–343, 9 2017.
- [18] R. Wróżyński, M. Sojka und K. Pyszny, "The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 96, p. 625–635, 10 2016.
- [19] E. Gromny, S. Lewinski, M. Rybicki, R. Malinowski, M. Krupinski, A. Nowakowski und M. Jenerowicz, „Creation of training dataset for Sentinel-2 land cover classification,” in *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, 2019.
- [20] D. Meier, *Entwicklung und Vergleich unterschiedlicher Navigationskonzepte in einer Virtual Reality Umgebung*, 2018.
- [21] T. Beier, *Navigation in nicht-euklidischen VR-Umgebungen*, 2020.
- [22] J. Menzel, *Ein Human-Machine-Interface für Helicopter-Handling-Systeme in virtueller Realität*, 2016.
- [23] T. M. Latta, *Eine Virtual-Reality Trainingsumgebung für die Zeichnungssystematik im Flugzeugbau*, 2019.
- [24] C. Blank, B. Wendholt und J. Wischhusen, "Mobile Mixed Reality Repair Kit," 2016.
- [25] J. Wischhusen, *Gerätesteuerung durch ein holografisches Userinterface*, 2016.
- [26] S. Burkard. und F. Fuchs-Kittowski., „Mobile Outdoor AR Application for Precise Visualization of Wind Turbines using Digital Surface Models,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management - GISTAM*, 2022.
- [27] J.-E. Kilimann, D. Heitkamp und P. Lensing, „An Augmented Reality Application for Mobile Visualization of GIS-Referenced Landscape Planning Projects,” in *The 17th International*

*Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, New York, NY, USA, 2019.

- [28] I. Engel, „Improving Binaural Audio Techniques for Augmented Reality,” 2021.
- [29] V. Patel, J. Cheer und S. Fontana, „Design and Implementation of an Active Noise Control Headphone With Directional Hear-Through Capability,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Bd. 66, p. 32–40, February 2020.
- [30] C. Schneiderwind, A. Neidhardt and D. Meyer, "Comparing the effect of different open headphone models on the perception of a real sound source," 2021.
- [31] M. Colombo, „Vision-based Acoustic Information Retrieval for Interactive Sound Rendering,” in *2021 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 2021.