



# EASY2VERIFY

## SCHLUSSBERICHT

### VERBUNDPROJEKT:

EVIDENZBASIERTES, ALLTAGSRELEVANTES SYSTEM FÜR BINAURALE  
HÖRSYSTEMVERIFIKATION

### TEILPROJEKT:

RÄUMLICH-VISUELLE PRÄSENTATION UND MESSUNG DER BLICKBEWEGUNG FÜR DIE  
BINAURALE HÖRSYSTEMVERIFIKATION

Der nachfolgende Bericht gibt eine Übersicht des Teilvorhabens im Projekt „easy2VERIFY“ der Firma Humatects. In diesem Teilprojekt ging es um die **räumlich-visuelle Präsentation und Messung der Blickbewegung für die binaurale Hörsystemverifikation.**

---

<sup>1</sup> Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## INHALT

I Kurzdarstellungen .....	3
1 Aufgabenstellung.....	3
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	4
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
II Eingehende Darstellungen .....	7
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	7
AP1 Konzeption eines Referenzsystems.....	7
AP3 Immersive Messumgebung .....	9
AP4 Systemintegration .....	13
AP5 Nutzerzentrierung.....	20
2 wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	22
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	22
4 Voraussichtlicher Nutzen (Verwertbarkeit des Ergebnisses, fortgeschriebener Verwertungsplan) .....	23
5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen.....	24
Literaturverzeichnis.....	25

## I KURZDARSTELLUNGEN

Im Projekt **easy2VERIFY** ging es um die Erarbeitung eines Messsystems und die audiovisuelle Präsentation für die binaurale Hörsystemverifikation.

Trotz der fortschreitenden Verbreitung bilateraler Versorgungen mit Cochlea-Implantaten (CI) und Hörgeräten (HG) stellt die Wiederherstellung einer natürlichen räumlichen Wahrnehmung in akustisch komplexen Alltagssituationen weiterhin eine zentrale Herausforderung dar. In der aktuellen klinischen Praxis erfolgt die Anpassung dieser Systeme oft separat, wobei der binaurale Abgleich mangels objektiver Verifikationsmethoden primär auf dem subjektiven Empfinden der Patienten basiert. Insbesondere bei asymmetrischen Hörverlusten oder bimodalen Versorgungen stößt dieser prozedurale Ansatz aufgrund der Komplexität frequenz- und pegelabhängiger Parameter an seine Grenzen.

Das Projekt „easy2VERIFY“ legte den Schwerpunkt auf die Entwicklung eines **alltagsnahen und ökologisch validen Messsystems**, das durch die Integration eines Mehrkanal-Audiometers und eines räumlichen Lautsprecherbaus eine realitätsnahe Überprüfung des Versorgungserfolgs ermöglicht. Ein innovativer Kernaspekt ist dabei der Einsatz von **Augmented Reality (AR)**: Durch die Überlagerung akustischer Reize mit korrespondierenden visuellen Szenen wird die im Alltag essenzielle multisensorische Integration abgebildet und cross-modale Plastizitätsphänomene systematisch berücksichtigt.

Im Gegensatz zu geschlossenen Virtual-Reality-Systemen erlaubt der AR-basierte Ansatz die Aufrechterhaltung der direkten Kommunikation zwischen Patienten und Fachpersonal, während gleichzeitig über integriertes Tracking präzise Daten zur Blickrichtung und Reaktionsgeschwindigkeit erhoben werden. Ziel des Projekts war es, ein Messsystem zu entwickeln, das von Hörakustikern, Audiologen und Kliniken eingesetzt werden kann. Anwendungen reichen von der iterativen Optimierung der Hörgeräte-Anpassung bis hin zur langfristigen Verlaufskontrolle in der Rehabilitation. Dieser Ansatz der Kombination aus einem alltagsrelevanten, räumlichen Messverfahren adressiert einen erhöhten Bedarf bei der audiologischen Nachsorge und kann die bilaterale Versorgung unterstützen.

### 1 AUFGABENSTELLUNG

In dem Teilprojekt „Räumlich-visuelle Präsentation und Messung der Blickbewegung für die binaurale Hörsystemverifikation“ wurden innovative Ansätze zur räumlich-visuellen Präsentation sowie die sensorische Erfassung von Blickbewegungen für die binaurale Hörsystemverifikation erforscht. Ziel war es, mittels Augmented-Reality-Technologien (AR) akustische Signale mit visuellen Objekten zu kombinieren und ein System zu schaffen, das durch die Verbindung von AR und Blickbewegungsmessung eine traditionelle audiologische Diagnostik um eine realitätsnahe, multisensorische Komponente erweitert. Die Aufgabenstellung gliederte sich in folgende Schwerpunkte:

**Konzeption eines Referenzsystems (AP 1):** Unterstützung bei der Konzeption eines Referenzsystems für Head/Eyetracking und die Erfassung von Blickrichtung und Reaktionszeiten.

**Immersive Messumgebung (AP 3):** Erarbeitung der technischen Grundlagen und des Alltagsbezugs für den Einsatz von Augmented-Reality und Eye-Tracking. Dieser Teil beinhaltete die immersive Umsetzung auf Basis des definierten Referenzsystems auf einem geeigneten AR-Headset.

**Systemintegration (AP 4):** Planung und Co-Entwicklung einer modularen Architektur für den Gesamt-Demonstrators und Integration des AR-Headsets in den Demonstrator, um die visuelle Darbietung mit der räumlichen Akustik zu synchronisieren.

**Nutzerzentrierung (AP 5):** Durchführung eines kontinuierlichen, iterativen Design-Prozess, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems für die Zielgruppen *Patienten*, *Akustiker* und *Audiologen* sicherzustellen. Der Fokus lag dabei auf der Frage, wie eine optimale Interaktion mit dem Gesamtsystem und dem AR-Headset aussehen kann.

## 2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Zu Beginn des Forschungsprojektes existierten in der klinischen Praxis und im Bereich der Hörakustik keine etablierten, alltagsnahen Messsysteme, die eine objektive Verifikation des binauralen Versorgungserfolgs unter Einbeziehung räumlicher audio-visueller Szenarien ermöglichten. Die Anpassung beidohriger Hörsysteme (bilaterale Versorgung) stützte sich weitgehend auf das subjektive Empfinden der Patienten und separate Messungen der Einzelgeräte.

Folgende Rahmenbedingungen prägten den Projektstart:

- **Mangel an Messmethoden:** Es fehlte an einem validen Verfahren, um den binauralen Benefit und das räumliche Hören alltagsgerecht zu quantifizieren.
- **Technologische Erprobung:** AR-Headsets und Eye-Tracking werden derzeit im Allgemeinen nicht für die klinische Audiometrie benutzt.
- **Fehlende Systemintegration:** Es gab keinen integrierten Demonstrator, der räumliche Akustik, visuelle AR-Reize und Eye-/Headtracking zeitsynchron koppelt.

## 3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das Projekt „easy2VERIFY“ war auf eine Gesamtlaufzeit von 36 Monaten ausgelegt und sah eine enge Verzahnung zwischen der konzeptionellen Vorarbeit, der technischen Umsetzung und der Gesamtintegration vor. Ein zentraler Fixpunkt im Projektablauf war der **Halbzeitmeilenstein in Monat 18**, der als entscheidende Grundlage für die Bewertung des Fortschritts diente.

**Ablauf bis zum Halbzeitmeilenstein (Monat 1–18):**

In der ersten Projekthälfte lag der Fokus auf der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen und der Entwicklung erster Funktionsprototypen.

- Humatects (HMT) konzentrierte sich auf die Erstellung erster Versionen der AR-Umgebung und die Implementierung der Blickmessung.
- Parallel dazu wurden die Schnittstellen für die spätere Systemintegration mit den Partnern Auritec (AUTC) und der Jade Hochschule (JHS) abgestimmt.
- Die Übereinstimmung von visueller und akustischer Präsentation und das Eye-Tracking wurden in verschiedenen Nutzerstudien ausgiebig getestet.

#### **Ablauf in der zweiten Projekthälfte (Monat 19–36):**

Nach erfolgreichem Abschluss des Halbzeitmeilensteins verlagerte sich der Schwerpunkt auf der iterativen Weiterentwicklung der AR-Komponente und auf die Systemintegration.

- Die AR-Komponenten wurden basierend auf den Ergebnissen der formativen Tests verfeinert.
- Es erfolgte die Integration des AR-Headsets mit dem Szenario-Controller auf Basis einer Client-Server Netzwerkarchitektur.
- Den Abschluss des Projektablaufs bildeten summative Nutzertests, um das Gesamtsystem zu evaluieren. Zwischen normalhörenden und (künstlich simulierten) schwerhörenden gab es signifikante Unterschiede.

#### **Ablauf in der Projektverlängerung (Monat 37-39):**

In dieser Phase lag der Fokus auf der Unterstützung beim Setup sowie bei der laufenden Nutzung des Systems. Zudem wurden auftretende Fehler identifiziert, analysiert und zeitnah behoben, um einen stabilen und reibungslosen Betrieb sicherzustellen.

Alle im Projektverlauf definierten Ziele konnten im vorgesehenen Zeitraum (einschließlich der genehmigten der Projektverlängerung) vollständig erreicht werden.

## **4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE**

Das Vorhaben baut auf bestehenden Verfahren der klinischen Audiometrie sowie dem Richtungshörttestverfahren ERKI auf, das grundlegende Ansätze zur Erfassung räumlicher Hörwahrnehmung bietet (Plotz, 2017). Bestehende Methoden weisen jedoch Einschränkungen hinsichtlich ökologischer Validität und räumlich-visueller Integration auf. Auch ist die Versorgung hinsichtlich binauraler Hörfähigkeit bei Hörverlust aktuell im Vergleich zu anderen Disziplinen oft unzureichend (McMahon, 2021). Die Methoden wurden daher im Projekt gezielt erweitert, um eine alltagsnahe, räumliche und binaurale Hörsystemverifikation zu ermöglichen und eine bessere Versorgung anzustreben.

## 5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Die Projektarbeiten wurden vollständig innerhalb des Projektkonsortiums durchgeführt. Eine über die Projektpartner hinausgehende Zusammenarbeit mit Dritten oder externen Stellen fand nicht statt. Der fachliche Austausch mit potenziellen Anwendern (z. B. Akustikern) zur Anforderungsanalyse wurde durch die entsprechenden Projektpartner im Rahmen der Interviews sichergestellt.

## II EINGEHENDE DARSTELLUNGEN

### 1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES IM EINZELNEN, MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEgebenEN ZIELE

Ziel des Teilprojekts von Humatects war es, die räumlich-visuelle Präsentation und Messung der Blickbewegung für die binaurale Hörsystemverifikation mittels innovativer AR-Technologien zu erarbeiten. Im Folgenden werden die maßgeblichen Beiträge in den Arbeitspaketen AP1, AP3, AP4 und AP5 entlang der vorgegebenen Ziele dargestellt. Im Mittelpunkt stehen die entwickelten Konzepte, Prototypen und Demonstratoren, Integrationsschritte und nutzerbezogenen Verbesserungen.

#### AP1 KONZEPTION EINES REFERENZSYSTEMS

---

##### ZIELSETZUNG LAUT ANTRAG

Ziel von AP1 war die Konzeption eines Referenzsystems zur Erfassung von Blickrichtung und Reaktionszeiten auf Basis geeigneter Head- und Eye-Tracking-Verfahren. Im Mittelpunkt standen die räumlich-audiometrischen Messverfahren und die Frage, wie visuelle und akustische Reize in einem reproduzierbaren Messablauf kombiniert werden können. AP1 bildet damit die konzeptionelle Grundlage für die nachfolgenden Umsetzungs- und Integrationsarbeiten in AP3 und AP4.

---

##### DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERZIELTE ERGEBNISSE

Zu Beginn des Projekts wurden gemeinsam mit den Projektpartnern die fachlichen, psychoakustischen und technischen Anforderungen an das geplante Messsystem zusammengeführt. Humatects untersuchte dabei unterschiedliche AR- und VR-Plattformen daraufhin, ob sie für die räumlich-visuelle Präsentation, die Erfassung von Blickrichtung sowie die Bestimmung von Reaktionszeiten geeignet sind.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden kabellose optische AR-Systeme und VR-Passthrough-Systeme als geeignet erkannt. Auf Basis dieser Technologie und den Anforderungen der Projektpartner ergab sich zugleich der konzeptionelle Experimentaufbau des Referenzsystems. Abbildung 1 zeigt die Grundanordnung aus Szenario-Controller, AR-Headset, Proband und Lautsprecherkreis. Bereits auf dieser Ebene war angelegt, dass visuelle Reize, akustische Signale und spätere Messdaten in einem gemeinsamen räumlichen Bezugssystem zusammengeführt werden.

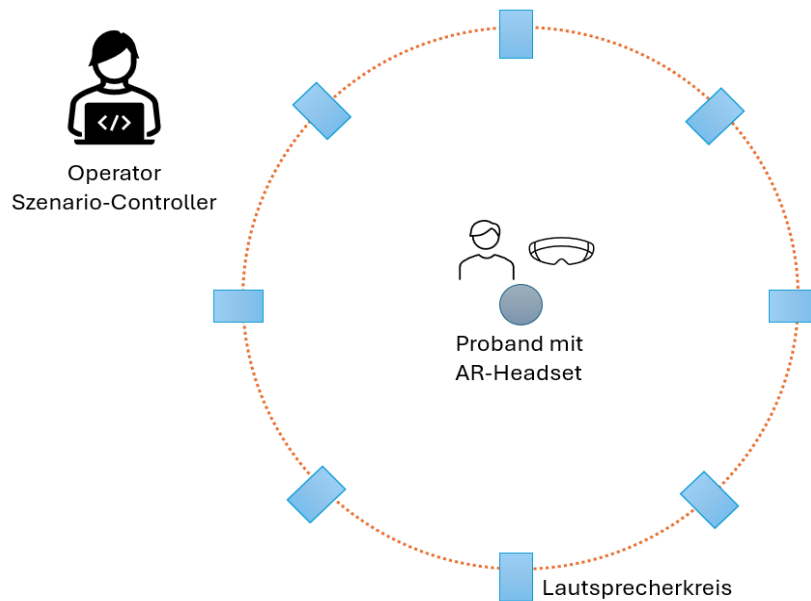


Abbildung 1: Konzeptueller Experimentaufbau

Parallel dazu wurde ein konzeptioneller Referenzablauf für die spätere Messung festgelegt. Abbildung 2 veranschaulicht dieses Prinzip: Ausgangspunkt ist ein definierter Null-Referenzpunkt, den der Proband vor dem jeweiligen Durchlauf fixiert. Anschließend wird ein Zielobjekt räumlich präsentiert und über Blickbewegung erfasst. Die Reaktionszeit ergibt sich aus der zeitlichen Folge von Ausgangsfixation, Blickbewegung und dem Erreichen eines definierten Erkennungszustands. Damit wurde bereits in AP1 ein durchgängiges Messprinzip formuliert, das die spätere praktische Umsetzung strukturiert hat.

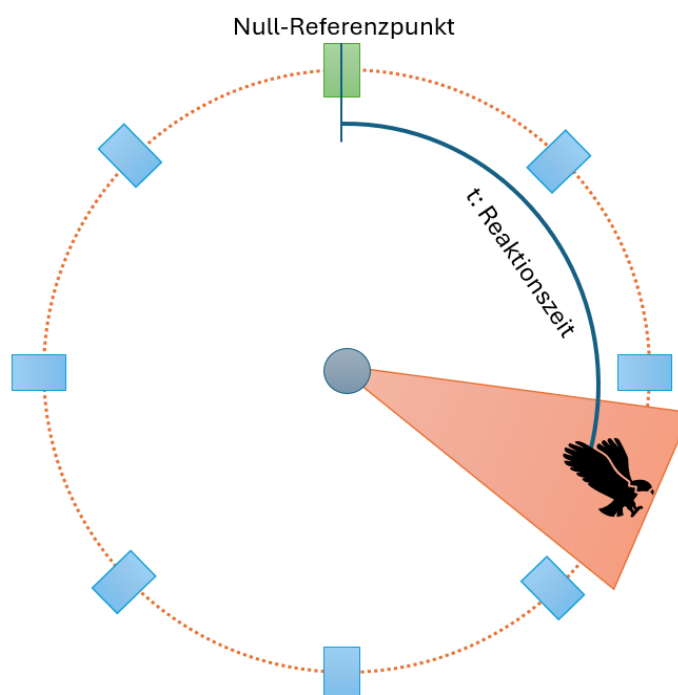


Abbildung 2: Referenzsystem zur Bestimmung von Blickrichtung und Reaktionszeit

In AP1 wurden außerdem verschiedene Szenariotypen und Aufgabenlogiken auf konzeptioneller Ebene untersucht. Dabei ging es nicht nur um die technische Darstellbarkeit visueller Reize, sondern auch um die Frage, welche Aufgabenformen für eine spätere Hörverifikation in einer realitätsnäheren Umgebung geeignet sind. Diese konzeptionelle Vorarbeit ging unmittelbar in die explorativen Prototypen in AP3 ein.

Das in AP1 formulierte Prinzip wurde im weiteren Projektverlauf in die spätere Testlogik übernommen. Dazu gehörten ein Kalibrierkonzept zur Synchronisation von Audio- und Bildlokalisierung sowie die wiederholte Nullpunktfixation im Messablauf.

---

## SOLL-IST-VERGLEICH

Der vorgesehene konzeptionelle Aufbau eines Referenzsystems wurde erreicht. Die grundlegenden Fragen zur technischen Eignung der Endgeräte, zur Rolle von Eye-beziehungsweise Head-Tracking und zur Struktur eines geeigneten Messparadigmas wurden bearbeitet und in ein tragfähiges Referenzprinzip überführt. Damit lag eine belastbare Grundlage für die spätere prototypische Umsetzung und Integration vor.

Abweichungen ergaben sich vor allem auf Ebene der konkret eingesetzten Hardware. Während in der frühen Projektphase mit der HoloLens 2 gearbeitet wurde, musste die operative Umsetzung später an geänderte Marktbedingungen angepasst werden. Die in AP1 erarbeitete konzeptionelle Grundlage blieb hiervon unberührt und wurde in AP3 und AP4 weitergeführt.

## AP3 IMMERSIVE MESSUMGEBUNG

---

### ZIELSETZUNG LAUT ANTRAG

Ziel von AP3 war es, die technischen Grundlagen für Augmented Reality und Eye-Tracking zu erarbeiten und daraus eine immersive, alltagsnahe visuelle Messumgebung für easy2VERIFY abzuleiten. Im Vordergrund standen die Entwicklung geeigneter visueller Szenen und Aufgabenlogiken für die Hörverifikation sowie deren Umsetzung auf einem Headset in einer praktisch nutzbaren Form.

---

### DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERZIELTE ERGEBNISSE

Aufbauend auf den konzeptionellen Vorarbeiten aus AP1 wurden zunächst die technischen Grundlagen für AR und Eye-Tracking erarbeitet. Dabei wurden unterschiedliche Headset-Klassen, insbesondere optische AR-Systeme und Passthrough-VR-Systeme, hinsichtlich räumlicher Darstellung, Tracking, Sichtfeld und praktischer Umsetzbarkeit bewertet. Optische AR-Systeme lassen die reale Umgebung direkt sichtbar und eignen sich damit für transparente Überlagerungen. Passthrough-VR-Systeme stellen die Umgebung kamerabasiert dar und bieten in der Regel ein größeres Sichtfeld sowie eine stärkere Immersion. Für die erste Prototypenphase wurde die HoloLens 2 eingesetzt, da sie Augmented Reality, Spatial Mapping und integriertes Eye-Tracking in einer für das Projekt geeigneten Form bereitstellte. Ein früher technischer Durchstich bestätigte, dass

eine audiovisuelle Präsentation mit räumlicher Aufgabe auf dieser Basis grundsätzlich realisierbar ist.

Im weiteren Verlauf entstanden mehrere Standalone-Prototypen mit unterschiedlichen Darstellungen und Aufgabenlogiken. Ein früher Szenariotyp arbeitete mit frei im Raum platzierten Zielobjekten, zunächst in Form animierter Diamanten, später in Form animierter Vögel. Die Probanden mussten das Zielobjekt nach akustischer und visueller Präsentation lokalisieren und anschließend mit dem Blick verfolgen. Bereits diese frühen Demonstratoren zeigten, dass die kombinierte akustische und visuelle Reizdarbietung stimmig wahrgenommen wurde. In späteren Iterationen wurden Reaktionszeiten, Testdurchläufe und eine einfache Auswertungslogik ergänzt. Die Prototypen dienen dazu, unterschiedliche Darstellungsformen, Reize und Aufgabenstrukturen für die spätere Hörverifikation zu erproben.

Abbildung 3 zeigt einen prototypischen Stand dieses freien Zielobjekt-Szenarios in der späteren Vogel-Variante. Die Darstellung steht zugleich exemplarisch für die zuvor erprobte Diamant-Demo, da beide Varianten denselben Interaktionsrahmen mit frei platzierten Zielen und blickgestützter Verfolgung nutzten.



Abbildung 3: Standalone-Prototyp „Bird-Demo“ als freies Zielobjekt-Szenario

Mit der Card Demo wurde ergänzend ein weiterer Szenariotyp entwickelt, der nicht mit frei im Raum verfolgten Zielobjekten, sondern mit verdeckten Auswahlobjekten arbeitet. Dabei muss die Richtung einer Schallquelle lokalisiert und anschließend das passende visuelle Objekt ausgewählt werden. Dieser Aufgabentyp ergänzte die freie Zielverfolgung um ein Format, das stärker auf Zuordnung und Entscheidung ausgerichtet ist. Abbildung 4 zeigt diesen Szenariotyp mit einer zunächst verdeckten Karte und der anschließenden Sicht auf das ausgewählte Zielobjekt. Die Gegenüberstellung verdeutlicht den Wechsel von reiner Zielverfolgung zu einer hörgestützten Richtungsentscheidung.



Abbildung 4: „Card Demo“ mit verdeckter und aufgedeckter Zielkarte (nach Auswahl)

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt war die Umsetzung alltagsnaher Umgebungen mit abgestufter Komplexität. Dafür wurden verschiedene Innen- und Außenräume erprobt, darunter auch 360°-Szenen aus alltagsnahen Kontexten. Ziel war es, den Übergang von einfachen Laborreizen zu komplexeren, realitätsnäheren Wahrnehmungssituationen vorzubereiten. Ein Ziel war es möglichst reale Umgebungen auf dem AR-Headset anzuzeigen. Herausfordernd war, dass detailreiche 3D-Modelle auf mobilen Endgeräten schnell an Leistungsgrenzen stoßen. Oft wird mit sogenannten Low-Poly Modellen gearbeitet, die allerdings weniger alltagsnahe Immersion zu lassen.

Um dennoch realitätsnahe Umgebungen darzustellen, wurden für diese Szenen Cubemaps eingesetzt. Technisch mappen Cubemaps ein hochauflösendes Bild auf einen Würfel, sodass ein immersiver und nahtloser Raum entsteht, der gleichzeitig performant gerendert werden kann. Neben dem Cube Mapping wurden weitere Optimierungstechniken eingesetzt, wie Level of Detail (LOD), Backface Culling und Occlusion Culling. Diese Techniken reduzieren die Anzahl an Vertices und erhöhen die Performance auf dem AR-Endgerät. So konnten alltagsnahe Umgebungen mit vertretbarem Ressourcenbedarf dargestellt werden.

Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen jeweils ein Screen-Capture des AR-Headset, auf dem drei verschiedene alltagsnahe Szenen dargestellt wurden.



Abbildung 5: Immersive Indoor-Alltagsszene (Theater)



Abbildung 6: Immersive Alltagsszene (Bahnhofshalle)



Abbildung 7: Immersive Outdoor-Alltagsszene (Waterfront)

---

## SOLL-IST-VERGLEICH

Die Ziele für AP3 wurden erreicht. Die technischen Grundlagen für AR und Eye-Tracking wurden erarbeitet, unterschiedliche Szenariotypen wurden prototypisch umgesetzt, und es entstanden immersive Umgebungen, mit denen der angestrebte Alltagsbezug praktisch untersucht werden konnte. Damit liegen mehrere belastbare Prototypen mit unterschiedlicher Aufgabenlogik und unterschiedlichem Reifegrad vor. Gleichzeitig wurden die Grundlagen geschaffen für die Integration in das Gesamtsystem.

Abweichungen ergaben sich vor allem aus der Veränderung der Hardwarebasis im Projektverlauf. Die ursprünglich genutzte HoloLens 2 musste durch eine Meta Quest 3 ersetzt werden. Diese Änderung wirkte sich auf die technische Ausprägung der Lösung aus, insbesondere auf die verfügbare Form des Trackings, änderte jedoch nicht die Grundrichtung des Arbeitspakets. Die vollständige Einbindung der entwickelten visuellen Komponenten in die Gesamtarchitektur des Demonstrators wurde anschließend in AP4 weitergeführt.

## AP4 SYSTEMINTEGRATION

---

### ZIELSETZUNG LAUT ANTRAG

Ziel von AP4 war die Planung und Co-Entwicklung einer modularen Architektur für den Gesamtdemonstrator sowie die Integration des AR-Headsets in den Demonstrator, um die visuelle Darbietung mit der räumlichen Akustik zu synchronisieren und Szenarien strukturiert ablaufen zu lassen. Der Schwerpunkt lag damit auf der Kopplung der zuvor entwickelten Teilkomponenten zu einer lauffähigen Gesamtumgebung für Demonstration, Nutzertests und wissenschaftlichen Studien.

---

## DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERZIELTE ERGEBNISSE

Die Arbeiten in AP4 begannen mit der Auslegung einer modularen Systemarchitektur, in der einzelne Komponenten über klar definierte Schnittstellen verbunden sind und bei Bedarf ausgetauscht werden können. Diese Architektur wurde gemeinsam mit den Projektpartnern spezifiziert und im Projektverlauf schrittweise verfeinert. Auf dieser Grundlage wurden zwei Video-Clients berücksichtigt: ein Client für das AR-Headset und im späteren Projektverlauf zusätzlich ein Client für tabletbasierte Tests. Auritec, zusammen mit der Firma KIZMO, übernahm die Implementierung des Tablet-Video-Clients sowie des Scenario Controllers, während Humatecs den Video-Client für das AR-Headset entwickelte. Damit war die Integrationsarchitektur von Beginn an auf flexible Komponentenwechsel und standardisierte Kommunikationswege ausgerichtet. Abbildung 8 zeigt eine vereinfachte Architekturübersicht mit den einzelnen Komponenten.

- **Soundengine (Audiometer AT-Research; oder ersatzweise ASIO-Soundkarte):** sorgt dafür, dass die Sounds entsprechend der Schallquellen-Parameter richtig ausgegeben werden
- **AR/VR-Software:** zeigt die Schallquellen in Echtzeit im Raum richtig an; kann ggf. zusätzlich andere Umgebungsobjekte einblenden
- **Controller-Software:** Synchronisiert Soundkarte und AR-Brille; organisiert den Programmablauf

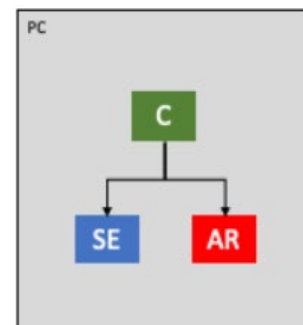


Abbildung 8: Vereinfachte Architekturübersicht

Für die Kommunikation zwischen den Komponenten wurden bewusst die Netzwerkprotokolle TCP und UDP kombiniert. Steuerungsbefehle, die den Ablauf des Experiments oder des Demonstrators beeinflussen, müssen zuverlässig übertragen werden. Positions- und Rotationsdaten müssen dagegen mit möglichst geringer Latenz verfügbar sein, damit visuelle und akustische Präsentation synchron bleiben. Für ersteres eignet sich daher ein zustandsbehaftetes Netzwerkprotokoll wie TCP, für letzteres ein zustandsloses wie UDP.

Auf dieser Basis wurde ein erweiterbares Kommunikationsprotokoll ausgearbeitet, das die Kopplung der beteiligten Komponenten strukturiert und gleichzeitig Raum für spätere Anpassungen lässt. Nachfolgend werden alle definierten Nachrichten zwischen Server und Client aufgelistet:

---

### SERVER -> CLIENT

<b>Name:</b>	<b>ConnectionAccepted</b>
<b>Description:</b>	Server hat Verbindung akzeptiert.
<b>Protokoll:</b>	TCP

<b>Id:</b>	1	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ServerMessage	string	Nachricht vom Server
ClientId	int	ClientId

<b>Name:</b>	<b>ScenarioObjectSpawned</b>	
<b>Description:</b>	Erstellt ein Szenario-Objekt	
<b>Protokoll:</b>	TCP	
<b>Id:</b>	2	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ObjectId	int	Objekt-Id
Name	string	Name des Objekts
AssetName	string	Asset Name des Szenario-Objekt
StartPosition	Vector3	
StartRotation	Quaternion	
StartScale	Vector3	

<b>Name:</b>	<b>ScenarioObjectRemoved</b>	
<b>Description:</b>	Entfernt ein Szenario-Objekt	
<b>Protokoll:</b>	TCP	
<b>Id:</b>	3	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ObjektId	int	

<b>Name:</b>	<b>PositionUpdated</b>	
<b>Description:</b>	Update der Position eines Objektes.	
<b>Protokoll:</b>	UDP	
<b>Id:</b>	4	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ObjectId	int	Objekt-Id
Position	Vector3	

<b>Name:</b>	<b>RotationUpdated</b>	
<b>Description:</b>	Update der Rotation eines Objektes.	
<b>Protokoll:</b>	UDP	
<b>Id:</b>	5	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ObjectId	int	Objekt-Id
Rotation	Quaternion	

<b>Name:</b>	<b>ScaleUpdated</b>	
<b>Description:</b>	Update der Größe eines Objektes.	
<b>Protokoll:</b>	UDP	
<b>Id:</b>	6	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ObjectId	int	Objekt-Id
Scale	Vector3	

---

CLIENT -> SERVER

<b>Name:</b>	<b>ConnectionCompleted</b>	
<b>Description:</b>	Videoclient ist erfolgreich mit dem Server verbunden.	
<b>Protokoll:</b>	TCP	
<b>Id:</b>	1	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ClientId	int	Client Id
ClientName	string	VR/AR Client Name
Assets	string[]	Liste von verfügbaren Assets (z.B. Taube, Geier, Uhu, Baum, Himmel)

<b>Name:</b>	<b>HeadTrackingUpdated</b>	
<b>Description:</b>	Update des Head Tracking.	
<b>Protokoll:</b>	UDP	
<b>Id:</b>	2	
<b>Parameter</b>	<b>Data Type</b>	<b>Description</b>
ClientId	int	Client Id

Die Nachrichten **ConnectionAccepted** und **ConnectionCompleted** werden für den initialen Austausch von ClientId und verfügbaren Assets auf dem Client verwendet.

**ScenarioObjectSpawned** sendet den Befehl an den Client ein Szenario-Objekt zu erstellen; **PositionUpdated** und **RotationUpdated** werden kontinuierlich bei Änderungen der Position und Ausrichtung der Szenario-Objekte gesendet. Der Client sendet kontinuierlich **HeadTrackingUpdated** an den Server, damit der Scenario-Controller die Kopfrichtung anzeigen und auswerten kann.

Im Zuge der weiteren Spezifikation wurde die Szenarienlogik aus dem Unity-Client in den Scenario Controller verlagert. Damit lag die Autorität über Testdurchläufe, Parametrisierung und Auswertung nicht mehr im einzelnen Client, sondern in einer zentralen Steuerungskomponente. Diese Entscheidung erleichterte die Unterstützung unterschiedlicher Video-Clients und stabilisierte die Integration der visuellen, akustischen

und messbezogenen Abläufe. Abbildung 9 zeigt die Benutzeroberfläche des Szenario-Controllers.

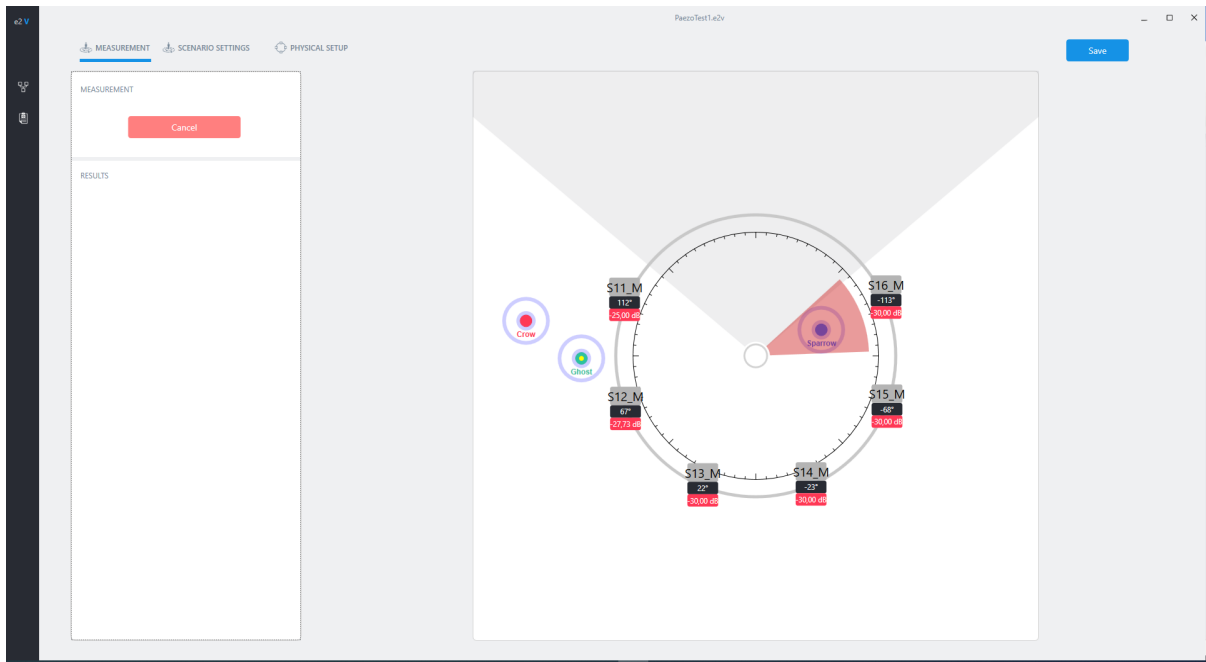


Abbildung 9: Scenario Controller als zentrale Kontroll-Komponente

Für den praktischen Betrieb des Demonstrators wurde außerdem eine externe Steuerungsmöglichkeit aufgebaut. Dazu wurden eine Remote-Control-Funktion über einen Broadcaster implementiert. Die Remote Control erlaubt es, Anwendungen auf dem Headset von außen zu starten und zu steuern. Der Broadcaster verteilt die Server-IP im lokalen Netzwerk, sodass sich der jeweilige Video-Client automatisch mit dem Server verbinden kann. Gerade in wechselnden Testumgebungen wurde dadurch die Inbetriebnahme deutlich vereinfacht. Abbildung 10 zeigt die hierfür eingesetzte Remote-Control- und Broadcast-Komponente. Über die Oberfläche konnten sowohl die Serveradresse verteilt als auch einzelne Client-Parameter von außen angepasst werden.

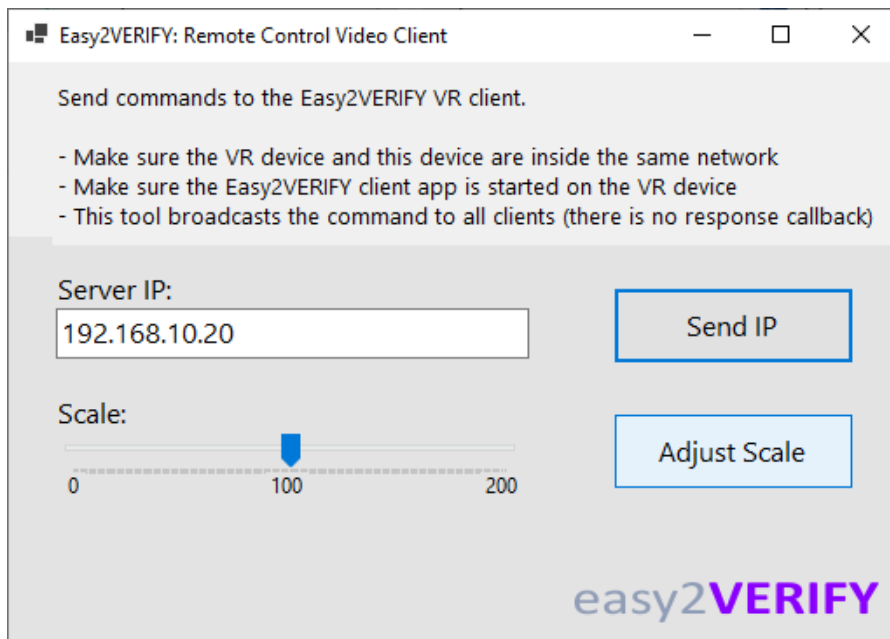


Abbildung 10: Remote Control und Broadcaster für den Video-Client

Die Integrationschritte wurden regelmäßig im Verbund mit den Projektpartnern geprüft. Dazu gehörten technische Abstimmungen, Integrationstreffen sowie Tests am realen Demonstrator mit Lautsprecherkreis, Szenario-Controller und Audiometer. Im laufenden Betrieb traten wiederholt Netzwerkkonfigurationsprobleme auf; für stabile Testaufbauten wurden deshalb unter anderem statische IP-Adressen eingesetzt. Parallel dazu wurden Netzwerkprotokoll und Bedienwege weiter vereinheitlicht. Abbildung 11 zeigt den realen Integrations- und Testaufbau mit Headset, Lautsprecherpositionen und Operator-Arbeitsplatz.



Abbildung 11: Realer Integrations- und Testaufbau des Gesamtdemonstrators

Abbildung 12 ergänzt diese Ansicht um ein Bild aus der Sicht des Operators im laufenden Betrieb. Sichtbar sind die zentrale Bedienoberfläche, der Lautsprecherkreis sowie die räumliche Anordnung von Versuchsperson. Mit diesem Setup wurde gemeinsam im November 2025 im PAEZO ein öffentlichkeitswirksames Video im Rahmen eines Testlaufs erstellt.

Die Funktionsfähigkeit der Integration wurde zusätzlich in formativen Nutzerstudien und Referenztests überprüft. Insbesondere ist eine Nutzerstudie zur Übereinstimmung von visueller und akustischer Präsentation durchgeführt worden; in den Referenzfällen traten keine Fehlzuordnungen zwischen visuellem Objekt und akustischem Signal auf. Darüber hinaus wurde die Funktionalität des Eye-Trackings in einer zweiten Nutzerstudie mit 20 Referenzfällen systematisch überprüft und konnte erfolgreich validiert werden.

---

### SOLL-IST-VERGLEICH

Die Ziele für AP4 wurden erreicht. Es wurde eine modulare Architektur aufgebaut, das Kommunikationsprotokoll für die relevanten Nachrichten und Datenströme entwickelt und erweitert, und die visuellen, akustischen und messbezogenen Komponenten wurden zu einer funktionsfähigen Gesamtumgebung integriert. Darüber hinaus konnte der integrierte Demonstrator unter Realbedingungen getestet und für Pilot- und Vorabmessungen vorbereitet werden.

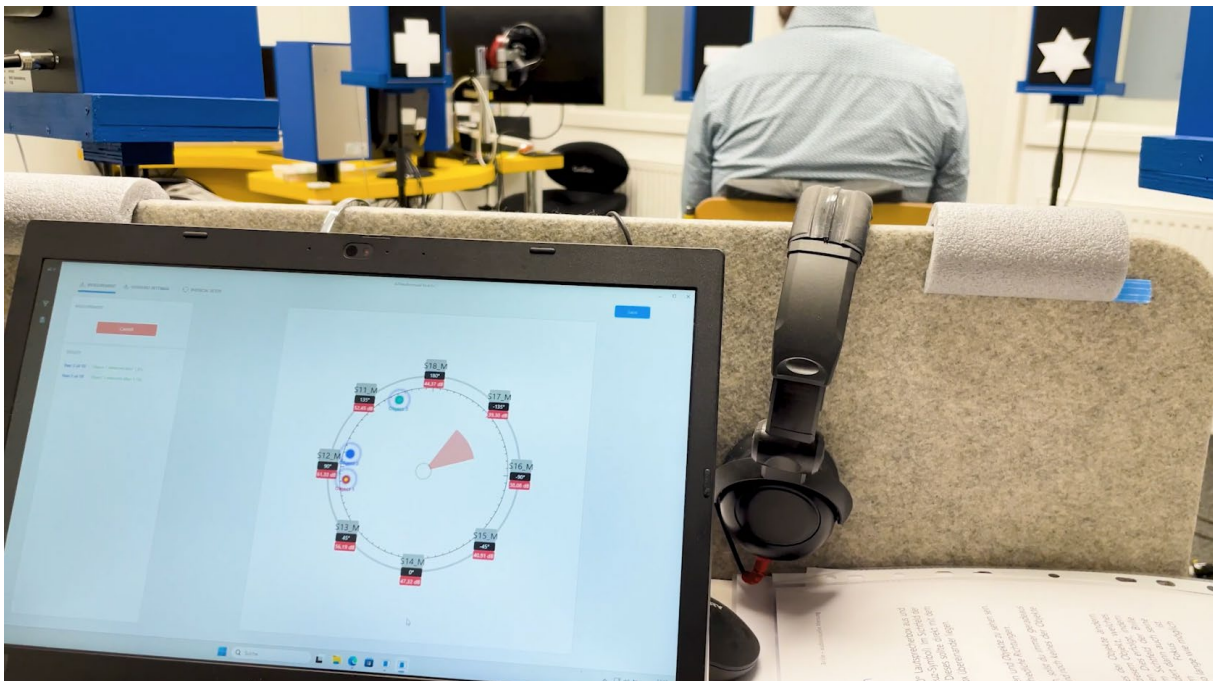


Abbildung 12: Szenario-Controller im laufenden Test

Anpassungsbedarf ergab sich vor allem in der konkreten technischen Ausgestaltung der Kommunikations- und Steuerungswege. Die Verlagerung der Szenarienlogik in den Scenario Controller, die Einführung von Remote Control sowie Maßnahmen zur Stabilisierung des Netzwerkbetriebs waren hierfür wesentliche Schritte. Diese Punkte wurden im Verlauf des Projekts bearbeitet, sodass zum Projektende eine belastbare Integrationsstufe für Demonstration und Nutzertests vorlag.

---

### ZIELSETZUNG LAUT ANTRAG

Ziel von AP5 war ein kontinuierlicher, iterativer Design-Prozess, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems für Patienten, Akustiker und Audiologen sicherzustellen. Im Vordergrund standen damit nicht allein technische Funktionen, sondern deren Verständlichkeit, Bedienbarkeit und Einbettung in einen praktikablen Messablauf.

---

### DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERZIELTE ERGEBNISSE

Die Arbeiten in AP5 wurden von Beginn an eng mit dem späteren Anwendungskontext verknüpft. Anforderungen aus der Praxis wurden in Abstimmungen mit Akustikern aufgenommen und in die Weiterentwicklung des Systems zurückgeführt. Die Nutzerzentrierung bezog sich damit nicht nur auf Oberflächenfragen, sondern auch auf den Ablauf der Messung, die Bedienlogik und die Rolle des Operators im Gesamtsystem.

Bereits in der mittleren Projektphase wurden für immersive Szenarien geeignete 3D-Modelle recherchiert und integriert. Zugleich wurde die Nutzererfahrung auf Basis erster Tests und Rückmeldungen schrittweise verbessert. Nach der Migration auf die Meta Quest 3 wurden Interaktionsprobleme im Zusammenhang mit Controllern und der Schärfe der Benutzeroberfläche analysiert und technisch behoben. Parallel dazu wurden im Rahmen von Live-Tests Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge von Anwendern dokumentiert und in mehrere Überarbeitungsstände des Video-Clients überführt.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeiten betraf die Fehleranalyse im laufenden Betrieb. Im Projektverlauf wurde ein schwer erkennbarer Fehler in der Winkelberechnung identifiziert. In Ausnahmefällen wurden negative Winkelwerte an den Server übergeben, was zu Messfehlern führen konnte. Das Problem wurde gemeinsam mit der Jade Hochschule, der Universität Oldenburg, Auritec und KIZMO analysiert und behoben.

Zugleich wurde die Benutzerführung konsequent vereinfacht. Dialoge und direkte Nutzerinteraktionen wurden reduziert, während Steuerungsfunktionen schrittweise auf den Scenario Controller beziehungsweise auf die Remote-Control-Funktionen verlagert wurden. Der Messablauf wurde damit stärker durch den Operator geführt, während die Belastung für Probanden reduziert wurde. Dies erleichterte sowohl die Instruktion der Testpersonen als auch die Durchführung des Gesamtablaufs.

Zur Unterstützung der Orientierung wurde außerdem ein visueller Sichtkegel auf dem Boden über das AR-Headset eingeblendet, der den Probanden anzeigt, in welche Richtung sie blicken und wann ein Objekt als erkannt registriert wird. Ergänzend wurden 3D-Objekte hinsichtlich Größe, Skalierung und visueller Zustandsdarstellung vereinheitlicht. Diese Maßnahmen dienten unmittelbar dazu, Missverständnisse im Messablauf zu verringern und die Gebrauchstauglichkeit unter realen Bedingungen zu verbessern.

---

## SOLL-IST-VERGLEICH

Die Ziele für AP5 wurden erreicht. Die Gebrauchstauglichkeit des Systems wurde fortlaufend im Entwicklungsprozess berücksichtigt. Feedback aus Tests und Live-Betrieb floss mehrfach in die Weiterentwicklung des Video-Clients, in die Vereinfachung der Benutzerführung und in die Überarbeitung der visuellen Darstellung ein. Darüber hinaus wurden technische Fehler analysiert und behoben, die sich unmittelbar auf die Verlässlichkeit des Messablaufs auswirkten.

---

## TABELLARISCHE GEGENÜBERSTELLUNG DER ZIELERREICHUNG

Die nachfolgende Tabelle listet die Zielerreichung der in der GVB aufgeführten Unterziele des Teilprojekts von Humatects auf. Sie ergänzt die vorangegangenen textlichen Einordnungen um eine kompakte Soll-Ist-Sicht.

Ziel	Kurzbeschreibung	Erreichungsgrad	Einordnung
HMT-01	Geeignete Szenen für die räumliche Präsentation visueller Reize definieren und evaluieren	erreicht	Mehrere verschiedene Szenariotypen einschließlich frei platzierter und bewegter Zielobjekte wurden entwickelt und erprobt.
HMT-02	Grafische AR-Elemente und deren Anordnung definieren und evaluieren	erreicht	Auswahl geeigneter visueller Zielobjekte und deren Komposition wurden iterativ angepasst.
HMT-03	Komplexitätsdimensionen für alltagsnahe Szenen definieren und evaluieren	erreicht	Alltagsnahe und realitätsechte Umgebungen wurden getestet, Komplexität wurde für den Demonstrator reduziert.
HMT-04	Visuelle und akustische Präsentation integrieren	erreicht	Die Kopplung visueller und akustischer Präsentation wurde architektonisch umgesetzt und in Referenzfällen ohne Fehlzuordnungen überprüft.
HMT-05	Blickbewegungsmessung und Reaktionsgeschwindigkeit definieren und evaluieren	erreicht	Referenzsystem und Eye-/Head-Tracking-Nachweis für Referenzfälle wurden ausgearbeitet und getestet.
HMT-06	Prozesse für Klinik- und Akustikeralltag definieren und evaluieren	erreicht	Praxisanforderungen, vereinfachte Benutzerführung und

			Maßnahmen zur Stabilisierung von Bedienung und Probandenführung wurden umgesetzt.
HMT-07	Visuelle Szenen mittels AR innerhalb einer Laborumgebung umsetzen	erreicht	Mehrere audiovisuelle Prototypen und alltagsnahe Szenen wurden auf Headsets in der Laborumgebung umgesetzt und demonstriert.
HMT-08	Blickmessung kombiniert mit AR innerhalb einer Laborumgebung umsetzen	erreicht	Blickmessung wurde in die prototypische und später integrierte Laborumgebung eingebunden und in Referenzfällen erfolgreich überprüft.
HMT-09	AR-Komponente, Blickmessung und Akustik zu einer integrierten Laborumgebung für Nutzertests verbinden	erreicht	Der Gesamtdemonstrator wurde integriert, unter Lab-Bedingungen getestet und für Pilot- und Vorabmessungen vorbereitet.

*Tabelle 1: Gegenüberstellung der Humatects-Unterziele aus der GVB mit dem im Projekt erreichten Stand.*

## 2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

## 3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Die von Humatects geleisteten Arbeiten waren notwendig, weil easy2VERIFY ein alltagsnahes und ökologisch valides Verfahren zur binauralen Hörsystemverifikation adressiert und hierfür eine belastbare räumlich-visuelle Komponente benötigt. Die Hörverifikation sollte gerade nicht bei abstrakten Laborreizen stehen bleiben, sondern akustische und visuelle Rauminformationen zusammenführen (Steven van de Par, 2022) und zugleich die Kommunikation mit dem Umfeld erlauben. Die Arbeiten an AR-beziehungsweise immersiven Headset-Technologien, visuellen Reizen und Blicherfassung waren ein unmittelbarer Bestandteil des Lösungsansatzes.

In AP1 war es erforderlich, geeignete AR-Technologien, Szenentypen, grafische Elemente, Komplexitätsdimensionen und Einbindungsprozesse für den Anwendungsfall zu bestimmen. Diese Vorarbeiten waren wichtig, um herauszufinden, welche Form der visuellen Präsentation für räumliche Hörverifikation geeignet ist und wie sich ein solcher Messansatz in einen praktikablen Ablauf überführen lässt.

In AP3 musste dieser Ansatz prototypisch umgesetzt werden. Die Entwicklung einer immersiven AR-Software, Einbindung von 3D-Objekten und alltagsnaher Umgebungen war notwendig, um zu prüfen, ob audiovisuelle Reize konsistent wahrgenommen werden, wie Blickverfolgung und Reaktionslogik sinnvoll eingebunden werden können. Gerade weil das Vorhaben auf alltagsrelevante statt rein abstrakte Testsituationen zielte, war die Arbeit an konkreten Szenen, Objekten und Interaktionsformen fachlich geboten.

In AP4 und AP5 lag die Notwendigkeit der Arbeiten in der Überführung der Einzelkomponenten in einen Gesamtdemonstrator. Die Integration des AR-Headset-Clients, die Abstimmung mit dem Szenario Controller und der akustischen Präsentation, die Verlagerung von Steuerungslogik sowie die Vereinfachung der Nutzerführung waren erforderlich, damit das System nicht nur technisch funktioniert, sondern auch in Demonstrationen, Pilot- und Vorabmessungen reproduzierbar eingesetzt werden kann.

Der Mitteleinsatz floss in diejenigen Entwicklungsanteile, die im Vorhaben geplant waren: Auswahl und Erprobung geeigneter immersiver Technologien, prototypische Szenenentwicklung, Integration in die Systemarchitektur und nutzerorientierte Überarbeitung des Bedienablaufs. Jeder wesentliche Arbeitsschritt diente entweder der fachlichen Machbarkeitsklärung oder der technischen Nutzbarmachung des Demonstrators.

Umfang und Durchführung der Arbeiten stehen damit in einem angemessenen Verhältnis zur Zielsetzung und dem Projektvorhaben. Ohne die von Humatects bearbeiteten AR-, Interaktions- und Integrationsaufgaben hätte der Verbund weder die alltagsnahe visuelle Komponente noch einen praktisch vorführ- und erprobaren Demonstrator erreicht. Die Arbeiten waren deshalb sowohl notwendig als auch im Umfang sachgerecht.

#### 4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN (VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES, FORTGESCHRIEBENER VERWERTUNGSPLAN)

easy2VERIFY schafft die Grundlage für eine alltagsnähere Verifikation binauraler Hörsystemversorgungen. Räumliches Hören kann mit gekoppelten akustischen und visuellen Reizen realistischer erfasst und für Anpassung, Verlaufskontrolle und Reha gezielter genutzt werden. Davon profitieren vor allem Kliniken, CI-Zentren, Audiologen, CI-Akustiker und perspektivisch auch Hörakustiker. Erwartbar sind eine zielgerichtetere Versorgung, eine bessere Dokumentation des Reha-Verlaufs und weniger Folgekorrekturen.

Geplant ist die Weiterentwicklung des im Projekt entstandenen Demonstrators zu einem marktfähigen Medizinprodukt. Humatects plant dabei die Softwaremodule für die AR-Unterstützung an Auritec zu lizenzieren. Für die im Projekt entwickelten Komponenten und den daraus abgeleiteten Lösungsansatz besteht ein hohes Marktpotenzial, zunächst bei klinischen Anwendern, CI-Zentren und CI-Akustikern und perspektivisch auch im breiteren Akustikermarkt. Im Verbund bestehen die Bestrebungen, die im Projekt entstandenen Komponenten durch technische Konsolidierung, weitere Validierung, Produktisierungsschritte, Lizenzierung und Folgekooperationen in die Verwertung zu überführen.

Für Humatects hat das Vorhaben zusätzlich strategischen Nutzen. Der Kompetenzaufbau in räumlicher Akustik, audiovisueller Nutzerführung und Headset-basierter Interaktion erweitert die bestehenden AR-Kompetenzen und ist auch in anderen medizinischen, trainingsbezogenen und industriellen Anwendungen nutzbar. Als nächste Schritte folgen technische Konsolidierung, weitere Validierung und die Vorbereitung der Produktisierung.

#### 5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZE BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS BEI ANDEREN STELLEN

Während der Durchführung des Vorhabens wurden dem Zuwendungsempfänger keine für das Vorhaben relevanten Fortschritte bei anderen Stellen bekannt.

## LITERATURVERZEICHNIS

McMahon, C. M. (2021). The inaugural World Report on Hearing: From barriers to a platform for change. *Clinical otolaryngology : official journal of ENT-UK*, 46(3), 459–463.

Plotz, K. &. (2017). Lokalisation realer und virtueller Schallquellen mit einem automatisierten Erweiterungsmodul am Mainzer-Kindertisch. *Z Audiol*, 56(1), 6–18.

Steven van de Par, S. D.-B. (2022). Auditory-visual scenes for hearing research. *Acta Acust.*, Volume 6, 55.