

Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2025-175

Abschlussbericht AR/XR in der Trainingssimulation

Interner Bericht

Tanja Dikarew-Martini
Malte-Jörn Maibach

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institutsbericht
IB 111-2025-175

Abschlussbericht AR/XR in der Trainingssimulation

Tanja Dikarew-Martini
Malte-Jörn Maibach

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abteilung Hubschrauber

Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich

Braunschweig, den 13.12.2025

Unterschriften:

Institutsleitung:

Abteilungsleiter*in: Dipl.-Ing. Marc Höfinger

Verfasser*in: Tanja Dikarew-Martini

Verfasser*in: Malte-Jörn Maibach

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	2
1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen	3
3 Planung und Ablauf.....	3
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
5 Zusammenarbeit.....	4
6 Erzielte Ergebnisse	5
6.1 AP 110 Marktrecherche zu aktuellen AR/XR Systemen	5
6.2 AP 130 Literaturrecherche zu AR/XR Technik und Forschungsprojekten	6
6.3 AP 140 Anforderungsdefinition für einen AR/XR- Hubschraubertrainingssimulator	8
6.4 AP 210 Beschaffung eines AR/XR Systems	9
6.5 AP 220 Vorevaluation des AR/XR-Systems auf einem Simulator mit Steuerkraftsystem....	9
6.6 AP 250 Testen und Validierung des AR/XR Gesamtsystems.....	17
6.7 AP 310 Entwicklung von Trainingsmissionen für die Simulatorstudie.....	18
6.8 AP 320 Entwicklung einer Bewertungsmethodik	19
6.9 AP 330 Vorbereitung eines klassischen FSTD für die Vergleichsstudie.....	23
6.10 AP 340 Validierung des Trainingsszenarios auf dem klassischen FSTD	23
6.11 AP 410 Durchführung von Simulatorstudien mit Piloten	23
6.12 AP 420 – Auswertung der Ergebnisse	25
6.13 AP 430 – Ableitung von Anforderungen an Qualifizierungsstandards für AR/XR- Trainingsgeräte.....	31
7 Nutzen und Verwendbarkeit	31
8 Fortschritt bei anderen Stellen.....	32
9 Veröffentlichung, Vorträge	32
10 Zusammenfassung der verwendeten Fachliteratur.....	33

Abkürzungsverzeichnis

2PASD	Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator
Airline Transport Pilot Licence (Helicopter)	ATPL(H)
Allgemeine Deutsche Automobil-Club	ADAC
AR	Augmented Reality
AVES	Air Vehicle Simulator
BWR	Bedford Workload Rating
CON	Conventional
CRS	Comfort Rating Scale
CS-FSTD(H)	Certification Specifications - Flight Simulation Training Device (Helicopter)
DRF	Deutsche Rettungsflugwacht
European Aviation Safety Agency	EASA
FFS	Full Flight Simulator
Flight Navigation Procedure Trainer	FNPT
Flight Training Device	FTD
FoV	Field-of_view
GF	Gewichtsfaktor
Helicopter Emergency Medical Service	HEMS
HFoV	Horizontals Field of View
Instrument Rating	IR
ITC	In-the-cockpit
LAT	Lufthansa Aviation Training
Luftfahrt Bundesamt	LBA
MISC	Misery Scale
MRCQ	Mixed Reality Comfort Questionnaire
MSAQ	Motion Sickness Assessment Questionnaire
MTE	Mission-Task-Element
Mult-Crew-Coordination	MCC
National Aeronautics and Space Administration	NASA
OTW	Out-the-window
Perceived Discomfort	RPE-D
PFD	Primary Flight Display
Pixel per Degree	PPD
PQ	Presence Questionnaire
Robot Operation System	ROS
SSQ	Simulation Sickness Questionnaire
SUS	Steed, Usoh, Slater Presence Questionnaire
TLX	Task Load Index
TS	Total Score
Vertical Flight Society	VFS
VFoV	Vertikales Field of View
VR	Virtual Reality
XR	Extended / Mixed Reality

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ARiTtra:

Dieser Abschlussbericht beschreibt die vom DLR im Rahmen des Forschungsvorhabens ARiTtra im Zeitraum vom 1.04.2022 bis 30.06.2025 durchgeführten Arbeiten und wurde entsprechend den Vorgaben für Zwischenberichte gemäß Nr. 8.1 NKBF 98 des BMWK angefertigt.

1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel des Verbundvorhabens ARiTtra ist die Evaluierung des Einsatzes von Augmented- und Mixed Reality (AR/XR) Trainingsgeräten für die Ausbildung und das Training von Hubschrauberpiloten.

Das Ziel des DLR-Anteils ist die wissenschaftliche Vor- und begleitende Arbeit, die Kampagnenplanung sowie die Flugeigenschaftsbewertung. Die Ziele im Vorhaben ARiTtra gliedern sich für das DLR in die folgenden Teilziele:

- Übersicht von aktuellen AR/XR-Systemen und Forschungsprojekten
- Vorvalidierung des beschafften AR/XR-Systems im DLR Forschungssimulator
- Planung der vergleichenden Simulationskampagnen
- Formulierung von Aussagen und Kriterien aus der Flugeigenschaftsbewertung mit subjektiven und objektiven wissenschaftlichen Methoden

2 Voraussetzungen

Das DLR Institut für Flugsystemtechnik kann durch vergangene Projekte im Air Vehicle Simulator (AVES) sowie dem Forschungshubschrauber ACT/FHS (Active Control Technology / Flying Helicopter Simulator) viel Erfahrung in der Flugeigenschaftsbewertung von Fluggeräten und Simulatoren nachweisen. Diese Expertise wurde bereits u.a. von Luftfahrtbehörden angefragt und konnte in die Erstellung von luftfahrttechnischen Gutachten einfließen. Mit dieser Kernkompetenz werden im Vorhaben ARiTtra die Planung und Durchführung von Simulatortests auf Basis von validierten wissenschaftlichen Methoden durchgeführt.

3 Planung und Ablauf

Das Vorhaben ist zum 1.04.2022 planmäßig gestartet. Im Mai 2023 fand die Vorevaluierung der AR/XR Headsets in dem DLR Simulator Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator (2PASD) statt. Im März 2024 gab es zusätzlich noch eine Studie mit Piloten um die Einsatzbarkeit der entwickelten Trainingsmissionen und erarbeiteten Bewertungsmethoden zu evaluieren. In September 2024 ist der ARiTtra Simulator beim Projektpartner REISER Simulation und Training GmbH mit einem Deutschen Rettungsflugwacht (DRF) Piloten validiert worden, wobei bereits die Bewertungsmethoden und die Trainingsszenarien eingesetzt worden sind.

Ende 2024 / Anfang 2025 hat die Vergleichsstudie des ARiTtra Simulators mit einem Full Flight Simulator (FFS) bei Lufthansa Aviation Training (LAT) stattgefunden. Da der FFS stark frequentiert ist, fanden die Studien erst Ende Dezember 2024 und im Januar 2025 statt. Um mögliche Ausfälle von Piloten abfangen zu können und im Anschluss noch ausreichend Zeit für die Auswertung der Studienergebnisse zu haben, wurde das Projekt um drei Monate bis zum 30.06.2025 verlängert.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Training von Flugzeug- und Hubschrauberpiloten auf Flugsimulatoren lässt sich grob auf die Zeit des ersten Weltkrieges zurückführen. Während es sich bei den ersten Flugsimulatoren um rein mechanische Trainingsgeräte ohne eine virtuelle Außensicht handelt, gehört eine virtuelle Welt bei

heutigen Flugsimulatoren, mit Ausnahme von reinen Verfahrenstrainern, zur Standardausstattung. Die Qualifizierungsvorschrift *Certification Standards- Flight Simulation Training Device (CS-FSTD(H))* der European Aviation Safety Agency (EASA) in [1] enthält die Anforderungen, welche ein Hubschrauber Simulator erfüllen muss, um als Ausbildungs- oder Trainingssimulator zugelassen zu werden. Dabei wird in drei Unterkategorien an FSTD unterschieden. Die Qualifizierung des Simulators durch eine Behörde ist notwendig, damit Piloten sich geleistete Flugstunden auf dem Simulator für ihre Ausbildung oder den Erhalt ihres Pilotenscheins anerkennen lassen können.

AR/XR in der Trainingssimulation Flight Navigation Procedure Trainer (FNPT), Level I-III

Bei einem FNPT handelt es sich um ein FSTD, welcher hauptsächlich für das Verfahrenstraining, die Multi-Crew-Coordination (MCC) oder Navigationstraining vorgesehen ist. Bei dem FNTP handelt es sich meist um kostengünstige Trainingsgeräte, welche in der Kategorie I weder ein visuelles Außenblicksystem noch eine Bewegungsplattform erfordern. Professionelle Hubschrauberpiloten mit einer Airline Transport Pilot License (Helicopter)/ Instrument Rating 1 (ATPL(H)/IR1)-Lizenz können von ihren erforderlichen 195 Flugstunden bis zu 10h auf einem FNPT I und bis zu 50h auf einem FNTP II/III ableisten.

Flight Training Device (FTD), Level 1-3

Bei einem FTD handelt es sich um einen FSTD mit einer bereits hohen Simulationsgüte. Ähnlich zu einem FNPT erfordert ein FTD keine Bewegungsplattform, eine Außensicht ist jedoch zwingend erforderlich. Piloten können auf einem FTD bereits die Typenzulassung für das entsprechende Hubschraubermuster ablegen und sich bis zu 60h der erforderlichen 195 Flugstunden für den ATPL(H)/IR auf einem FTD 2 und 3 anrechnen lassen.

Full Flight Simulator (FFS), Level A-D

Der FFS bietet die höchste Simulationsgüte eines FSTD und ist damit der Realität am Nächsten. Zusätzlich zum FNPT und FTD ist eine Bewegungs- und Vibrationsplattform notwendig.

An die Außensicht gibt es hohe Anforderungen bezüglich Auflösung und Sichtfeld. Von den 195 notwendigen Trainingsstunden bei einem ATPL(H)/IR lassen sich in einem FFS C und D bis zu 65h anrechnen.

Kombination Flugsimulation mit Virtual Reality

Im April 2021 hat die EASA den weltweit ersten VR-Simulator qualifiziert, was auch als erster Schritt auf dem Weg zur Qualifizierung von XR-Simulatoren zu verstehen ist. Die Qualifizierung gilt bisher nur für den zweisitzigen Hubschrauber Robinson R22 in der Kategorie FNPT Level II. Der von der Firma Loft Dynamics hergestellte Simulator nutzt eine Varjo VR Brille für die Außensichtdarstellung. Der Pilot sitzt während des Trainings in einer hubschrauberähnlichen Zelle.

5 Zusammenarbeit

Das Projekt ARiTtra wurde als Verbundvorhaben mit REISER Simulation und Training GmbH durchgeführt. Besondere Erwähnung verdient die Zusammenarbeit mit der DRF Flugrettung und der LAT. Die DRF stellte sowohl Piloten für die Validierung des ARiTtra Simulators als auch für die Simulationsstudien zur Verfügung. Für die Studien wurde der FFS der DRF bei LAT genutzt. Für die Vergleichsstudie konnte ARiTtra-Simulator vor Ort in der Nähe des FFS bei der LAT aufgestellt werden.

6 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend werden die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und erreichten Ergebnisse zu den betroffenen Arbeitspaketen beschrieben.

6.1 AP 110 Marktrecherche zu aktuellen AR/XR Systemen

Als Vorbereitung für die Anforderungsanalyse in AP 140 wurde in diesem Arbeitspaket eine umfassende Informationssammlung zu Augmented Reality (AR)- und Mixed Reality (XR/MR)-Systemen erstellt. Diese Systeme wurden anhand ihrer technischen Eigenschaften und Fähigkeiten für den Einsatz in dem Projekt ARiTra analysiert und bewertet. Als Quellen für die Informationssammlung wurden hauptsächlich Websites verwendet, da diese den aktuellsten Stand der Technik und der Marktverfügbarkeit darstellen. Es wurden die Internetauftritte der Hersteller von AR/XR-Systemen sowie Vergleichsportale genutzt.

Vor der Recherche der Informationen wurden die Spezifikationen festgelegt, welche für die Nutzung einer AR/XR-Brille in einem Hubschrauber-Trainingssimulator eine wichtige Rolle spielen. Dazu zählen die nachfolgend aufgeführten Kriterien.

Gewicht: Das Gewicht eines kopfgetragenen Systems spielt für den Einsatz im Trainingssimulator aus Ergonomie- und Immersionsgründen eine wichtige Rolle. Bei einem zu schweren System kann das Training aufgrund von Muskelverspannungen nach kurzer Zeit abgebrochen werden müssen. Weiterhin wird die Immersion durch die fehlende Ergonomie und körperliche Beschwerden verhindert. Moderne AR/XR-Brillen beinhalten mittlerweile weiterhin viel Technik, welche häufig im vorderen Bereich der Einheit untergebracht ist. Dies kann bei zu hohem Gewicht aufgrund der ungünstigen Schwerpunktlage schnell zu Nackenschmerzen führen.

Sichtfeld (Field of View, FoV): Das Sichtfeld trägt maßgeblich zur Simulationsgüte von Simulatoren bei. Die derzeitigen Qualifizierungsvorschriften für Hubschrauber-Trainingssimulatoren der EASA (FSTD-H [1]) schreiben beispielsweise ein kontinuierliches horizontales FoV (HFoV) von 180° und ein vertikales FoV (VFoV) von 60° für die Klasse FFS Level D und ein HFoV von 150° und VFoV von 60° für einen FTD Level 3 vor. Obwohl es noch keine Qualifizierungsvorschrift für Virtual- oder Mixed Reality Simulator gibt, können diese Werte als Orientierung dienen.

Auflösung: Die Qualität einer virtuellen Darstellung hängt unter anderem von der Auflösung ab. Die EASA FSTD-H gibt hierzu nur Richtwerte für die „Light Point Size per Arc Minute“, welche nicht auf Virtual Reality (VR)/XR/AR-Displays angewendet werden können. Ein essentieller Richtwert für die Mindestauflösung ist das Ablesen von Instrumenten auf den Cockpitanzeigen. Weiterhin muss es für diverse Trainingsszenarien möglich sein, Checklisten lesen zu können. An diesem Punkt muss zwischen den verschiedenen AR- und XR-Technologien unterschieden werden. Während durch eine AR-Brille die reale Welt erkennbar ist und demnach in bestimmten Szenarien eine kleinere Auflösung ausreicht, ist bei XR-Brillen mit Darstellung der virtuellen Realität als Kamera-See-Through-Bild eine sehr hohe Auflösung notwendig.

Pixeldichte: Um die Displayauflösung in Relation zum Sichtfeld zu setzen, wurde die Spezifikation der Pixeldichte (Pixel per Degree (PPD)) verwendet. Zur Berechnung wurde die folgende Formel verwendet:

$$\text{PPD} = \frac{\text{pixel width}}{\text{HFoV}}$$

Bildwiederholrate: Insbesondere für hochdynamische Szenen, wie es auch auf eine Hubschrauber-trainingssimulation bei hohen Fluggeschwindigkeiten zutrifft, ist eine hohe Bildwiederholrate notwendig. Weiterhin sorgt eine hohe Bildwiederholrate für eine flüssige Darstellung der Simulation und erreicht damit eine höhere Simulationsgüte und bessere Immersion.

Zusätzliche Ausstattungsmerkmale: Zu weitere Ausstattungsmerkmalen, welche von Vorteil für einen Trainingssimulator sind, zählen:

- Handtracking
- Eyetracking
- Headtracking
- Schnittstellensoftware
- Verbindungsmöglichkeiten (Drahtlos, kabelgebunden)
- Audioausgabe
- Standalone / PC-gebunden

Zur Bewertung der einzelnen Produkte in einer bestimmten Dimension/Kriterium wurde ein Bewertungssystem aufgebaut. Nach dem System erhalten die besten Kandidaten jeweils die volle Punktzahl von 3 Punkten und die schlechten Kandidaten die Punktzahl von 0 Punkten. Alle Kandidaten dazwischen erhalten die Punkte in äquivalenten Abständen zwischen dem besten und schlechten Wert. Die Bewertungsformel beispielsweise für das Gewicht lautet wie folgt:

$$\text{Punkte}_{\text{Gewicht},i} = \text{runden} \left(\frac{m_{\text{Max}} - m_i}{\frac{m_{\text{Max}} - m_{\text{Min}}}{3}} \right)$$

Um die Gesamtbewertung für ein Produkt zu erhalten, werden die Punkte der einzelnen Dimensionen/Kriterien mit einem Gewichtungsfaktor (GF) gewichtet und addiert, wie in der folgenden Formel dargestellt:

$$\begin{aligned} \text{Punkte}_{\text{Gesamt},i} &= \text{Punkte}_{\text{Gewicht},i} \cdot GF_{\text{Gewicht}} + \text{Punkte}_{\text{FoV},i} \cdot GF_{\text{FoV}} + \text{Punkte}_{\text{Auflösung},i} \cdot GF_{\text{Auflösung}} \\ &\quad + \text{Punkte}_{\text{Pixeldichte},i} \cdot GF_{\text{Pixeldichte}} + \text{Punkte}_{\text{Bildwiederholrate},i} \cdot GF_{\text{Bildwiederholrate}} \\ &\quad + \text{Punkte}_{\text{Ausstattungsmerkmale},i} \cdot GF_{\text{Ausstattungsmerkmale}} \end{aligned}$$

6.2 AP 130 Literaturrecherche zu AR/XR Technik und Forschungsprojekten

In diesem Arbeitspaket wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurde der Fokus der Recherche auf folgende Aspekte gelegt: „Virtual, Augmented und Mixed Reality im Allgemeinen“, „Präsenz und Simulationskrankheit“, „Training und Simulation“, „Mensch-Maschine Schnittstelle“ und „Forschungsarbeiten über zukünftige AR/VR Anwendungen“.

Virtual, Augmented und Mixed Reality im Allgemeinen: Virtuelle Realität und reale Welt sind folgendermaßen in [2] definiert: Die virtuelle Umgebung (Virtual Reality (VR)) wird derart definiert, dass die Person vollständig in eine synthetische Welt eintaucht. Im Gegensatz dazu ist die reale Welt durch die Gesetze der Physik begrenzt. Alles, was dazwischen liegt, wird als gemischte Realität (Mixed Reality (MR)) definiert, bei der die reale und die virtuelle Welt in verschiedenen Abstufungen vermischt werden.

Ein weiterer Aspekt, neben der Definition der verschiedenen Realitäten, ist auch die dahinterstehende Technologie. Es wird zwischen "see-through" Displays und monitorbasierten Displays unterschieden. Bei den „see-through“ Displays kann der Betrachter durch das Display hindurchsehen und gleichzeitig virtuelle Objekte und Szenen eingeblendet bekommen. Bei dieser Technik ist das Bewusstsein der realen Welt/Umgang sehr hoch, da der Betrachter direkt die reale Welt wahrnehmen kann. Bei den monitorbasierten Displays werden sowohl die virtuellen Objekte/Szenen als auch die reale Welt, die beispielsweise durch eine Kamera aufgenommen wird, auf dem Display angezeigt.

Sowohl das "see-through" Display als auch das monitorbasierte Display können ein kopfgetragenes System als auch ein freistehender Bildschirm sein.

Präsenz und Simulationskrankheit: Präsenz ist in [3] definiert als die subjektive Erfahrung, an einem Ort oder in einer Umgebung zu sein, auch wenn man sich physisch an einem anderen Ort befindet. Hierbei spielen Immersion und Involvierung eine große Rolle. Immersion wird dadurch gekennzeichnet, dass man in sich in einer Umgebung befindet, in der man auch Bestandteil davon ist und mit ihr interagieren kann. Die Involvierung bezeichnet dagegen, dass die Person seine Energie und Aufmerksamkeit bestimmten Reizen widmet. Somit ist die Präsenz ein wichtiger Faktor um die virtuelle Umgebung zu bewerten.

Bei der Benutzung von VR-Technik kann bei Personen die Simulationskrankheit auftreten. Laut [4] sind die Symptome vergleichbar mit der Bewegungskrankheit. Der Unterschied bei der Simulationskrankheit besteht darin, dass die Person sich nicht bewegt, jedoch ein bewegtes Bild sieht und dementsprechend den Eindruck bekommt, dass der Körper in Bewegung ist. Mögliche Symptome, die dadurch auftreten können, sind zum Beispiel: Schwindel, Übelkeit, Schweißausbruch, Kopfschmerzen und Erbrechen.

Training und Simulation: Es wird immer mehr Simulation im Training, z.B. auch für Hubschrauberpiloten, eingesetzt. Der Einsatz von Simulation bringt einige Vorteile mit sich. Es können anspruchsvolle und risikoreiche Aufgaben in einer sicheren Umgebung geübt werden. Gleichzeitig können die Einsatzkosten z.B. von einem realen Hubschraubereinsatz, eingespart werden. Zusätzlich können Trainingsszenarien dargestellt werden, die in Realität nicht trainiert werden können, wie z.B. einen Heckrotorausfall. Jedoch hat der Einsatz von Simulation für das Training nicht nur Vorteile. So kann bei einem Simulationstraining bei dem Ausbildenden die Simulationskrankheit (Simulation Sickness) auftreten, die mit Übelkeit und Schwindel einhergeht. Ebenfalls kann durch fehlende realitätsnahe Simulation die Trainingseffektivität reduziert werden. Dabei sind laut [5] die Trainingseffektivität in der Simulation von dem Transfer der gelernten Fähigkeiten abhängig. Weitere wichtige Faktoren sind dabei der Gütegrad der Simulation, die Immersion und die Präsenz.

Neben der reinen Simulation, kann beispielsweise ein teilsimulierte Training durchgeführt werden. So hat die National Aeronautics and Space Administration (NASA) mit System Technology Inc. zusammen bereits 2013 ein selbstkonstruierte „fused-reality“ Brille entwickelt und einem teilsimulierten Luft- zu Luftbetankungsszenario eingesetzt [6]. Dabei flogen Piloten das zu betankende Flugzeug und trugen die Fused-Reality Brille. Im Bereich der Fenster wurde ein simuliertes Tankflugzeug mit Drogue gezeigt und somit ein teilsimulierte Tankmanöver durchgeführt.

Mensch-Maschine-Schnittstelle: Bei dem Einsatz von technischen Systemen ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle ein wichtiger Bestandteil. Wird der Mensch in der Simulation als Avatar dargestellt, ist die Interaktion zwischen der bewegten Hand des Menschen und beispielweise dem Cockpit ein wichtiger Faktor für die Immersion der Simulation. [7] hat die Hand-Knopf Interaktion in einem generischen virtuellen Cockpit untersucht. In der Studie sind zwei Aspekte untersucht worden. Zum einen der Einfluss des Detailgrades der Avatar-Hand und zum anderen die Größe der Kollisionsfläche. Hier zeigte sich, dass eine detaillierte Avatar-Hand eine höhere Trefferquote der Knöpfe im Cockpit

erreicht als die weniger detaillierte Avatar-Hand. Die Größe der Kollisionsfläche hat bei der Trefferquote der Knöpfe einen geringeren Einfluss.

Ein weiterer Faktor, der die Immersion des Menschen beeinflusst, ist das FoV des Headsets. In [8] ist eine Studie durchgeführt worden, um den Einfluss des FoV auf die räumliche Wahrnehmung und die Leistungsfähigkeit des Menschen während einer Simulation zu evaluieren. Hierzu sollte der Mensch zwei Aufgaben durchführen: mit einem VR Headset mit unterschiedlichen FoV ein Objekt in der Nähe suchen und durch ein Labyrinth laufen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein geringes FoV zu einer geringen räumlichen Wahrnehmung führt. Ebenfalls war die Leistung des Menschen mit einem größeren FoV höher.

Zukünftige AR/VR Anwendungen: Kopfgetragene Displays werden seit vielen Jahren auf militärischen Flugmissionen eingesetzt. Die Weiterentwicklung dieser Technologie eröffnet aber auch neue Möglichkeiten, wie zum Beispiel an neuen Cockpit-Layouts zu forschen und weiterzuentwickeln. Eine Beispieldienwendung wird in [9] beschrieben. Hier werden sogenannte virtuelle Cockpitinstrumente erforscht, die an unterschiedlichen Stellen im Cockpit vom Piloten positioniert werden können. Das virtuelle Cockpitinstrument zeigt eigens entwickelte Symbolik zur Unterstützung für den Schwebeflug an, welche in einem Offshore Szenario getestet wird.

Eine weitere Anwendung von AR-Technik ist der Einsatz für visuelle Pilotenassistenzsysteme zur Erhöhung der Flugsicherheit und Betriebsbereitschaft von Hubschraubern. In [10] ist eine HoloLens eingesetzt worden um den Piloten wichtige Fluginformationen (Horizontlinie, Geschwindigkeit, Hindernisse, etc.) im Sichtfeld anzuzeigen. Neben der Steigerung des Situationsbewusstseins, wird somit auch die Arbeitslast reduziert.

6.3 AP 140 Anforderungsdefinition für einen AR/XR- Hubschraubertrainingssimulator

Zur Ableitung von Anforderungen an das AR/XR-System wurden drei verschiedene Kategorien betrachtet. Diese Kategorien sind die

1. Anforderungen aus Qualifizierungsvorschriften,
2. Anforderungen aus Anwendungsperspektive und
3. Technische Anforderungen.

Zur Bestimmung der **Anforderungen aus Qualifizierungsvorschriften** wurden die derzeit geltenden Qualifikationsanforderungen an Hubschraubertrainingsimulatoren der EASA, die EASA FSTD-H, genutzt. Diese stellt Bedingungen an konventionelle Simulatoren. Der Gütegrad der Simulatoren wird in FNPT Level I-III (und MCC), FTD Level 1-3 und FFS Level A-D eingeteilt. Während bei einem FNPT Level I nur wenige Trainingsstunden für das Pilotentraining angerechnet werden können, kann bei einem FFS Level D im Gegensatz dazu fast ein komplettes Type Rating anerkannt werden. Für den AR/XR-Simulator wurde die Annahme getroffen, dass dieser den Anforderungen aus der FSTD-H für einen FFS Level D oder FTD Level 3 genügen muss.

Um **Anforderungen aus Anwendungsperspektive** bestimmen zu können, wurden zwei Telefonkonferenzen mit einem ehemaligen Leiter des Allgemeinen Deutschen Automobil-Club (ADAC) Helicopter Emergency Medical Service (HEMS)-Academy Hubschraubertrainingszentrums durchgeführt. Hierbei wurden mögliche Trainingsszenarien betrachtet und davon ausgehend die notwendigen Anforderungen abgeleitet.

Die **technischen Anforderungen** leiten sich hauptsächlich aus den Limitierungen des geplanten Systemaufbaus und der Verfügbarkeit der Technologien zum derzeitigen Zeitpunkt ab.

Die Anforderungsanalyse wurde hauptsächlich auf Systemebene erstellt. Die detaillierten Anforderungen an einzelne Subsysteme und Komponenten werden im Laufe der weiteren Detailplanung und Entwicklung aus den Systemanforderungen abgeleitet.

6.4 AP 210 Beschaffung eines AR/XR Systems

Nach der Erstellung der Informationssammlung wurde anhand der in AP 110 entwickelten Formel die gewichteten Gesamtbewertungen für jedes Produkt berechnet. Zwei Produkte wurden dabei als mögliche Kandidaten für den AR/XR-Simulator identifiziert:

- VREngineers XTAL3 Mixed Reality
- Varjo XR-3 Focal Edition

Während die XTAL3 ein größeres Sichtfeld bietet, punktet die XR-3 mit einer sehr hohen Auflösung und einer Fokusdistanz auf Ebene der Cockpitinstrumente. Die Entscheidung ist daher für die Varjo XR-3 Focal Edition ausgefallen. Diese XR-Brille wurde Anfang April 2023 durch das DLR beschafft.

6.5 AP 220 Vorevaluation des AR/XR-Systems auf einem Simulator mit Steuerkraftsystem

Die in AP 210 beschaffte XR-Brille (Varjo XR-3 Focal Edition) wurde in diesem Arbeitspaket in den Festsitzsimulator 2PASD integriert, wie in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: 2PASD Simulator mit Mixed Reality Setup © DLR. Alle Rechte vorbehalten.

Das XR-System erhält für die Simulation verschiedene Informationen aus diversen Datenquellen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Mixed Reality-Applikation läuft dabei in der Video-/Game-Engine Unity3D. Die gerenderten Darstellungen aus der Unity3D-Applikation werden über die Varjo Base-Software auf der XR-Brille dargestellt. Für die visuelle Darstellung der Flugsimulation wird die kommerzielle Software Prepar3D V4.5 genutzt. Die Berechnung der Flugzustände erfolgt über das DLR-eigene Flugmodell HeliWorX. Eine Übertragung der Daten aus dem Flugmodell findet über eine selbst entwickelte Schnittstellensoftware auf Basis des Robot Operation System (ROS)-Frameworks statt.

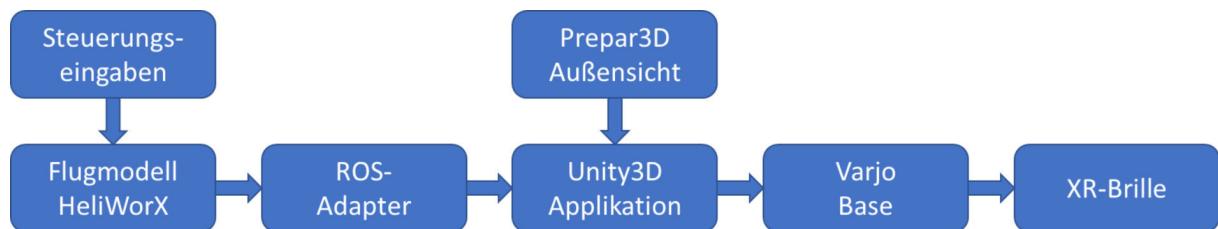


Abbildung 2: Datenfluss in der XR-Simulation im 2PASD-Simulator

In Mai 2023 hat eine Vorevaluation mit drei Piloten im dem 2PASD [11] stattgefunden. Dabei wurden zwei verschiedenen AR/XR Headset als Sichtsysteme mit dem konventionellen 2PASD Simulator Sichtsystem (TV Displays) verglichen. Die Ergebnisse wurden auf dem Vertical Flight Society (VFS) Forum im Mai 2024 vorgestellt. Die folgenden Inhalte basieren auf der Veröffentlichung [12].

Systemübersicht:

Der 2PASD (Abbildung 3) verfügt über zwei Pilotensitze mit gekoppelten Sidesticks, fünf TV-Displays für das visuelle System und ein nichtlineares, flugdynamisches dynamisches Modell eines EC135 Hubschraubers. Der Simulator verfügt über einen Flugregler zur Stabilisierung des Hubschraubers.



Abbildung 3: 2PASD am DLR Braunschweig © DLR. CC BY-NC-ND

Für die Vorevaluation sind folgende Konfigurationen als visuelle Sichtsystem im Hubschrauber Simulator evaluiert worden: Virtual Reality (VR), Mixed Reality (MR), Augmented Reality (AR) und die TV Displays der konventionellen (CON) Konfiguration des Simulators. Die VR und MR Konfiguration wurde mit der Varjo XR-3 Focal Edition umgesetzt, während die AR Konfiguration mit dem JVC Headset umgesetzt wurde. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die wichtigsten technischen Spezifikationen.

Tabelle 1: Übersicht der technischen Spezifikationen der Sichtsysteme

Technische Spezifikation	JVC HMD-VS1D	Varjo XR-3	TV Displays
Display System	Durchsichtiges Display (see-through display)	monitorbasiertes Display (monitor-based display)	Bildschirme
Sichtfeld (Field of View: h x v)	120° x 45°	115° x 90°	148° x 48°
Aktualisierungsrate	60 Hz/ 70 Hz	90 Hz	-
Gewicht	1320 g	980 g	-

Die Varjo XR-3 ist ein monitorbasiertes Headset mit einem Sichtfeld von 115° × 90° (horizontal × vertikal). Für die Studie wird die Varjo XR-3 Focal Edition verwendet, bei der die Brennweite zwischen 30 cm und 80 cm liegt.

Das JVC-Headset hingegen hat ein durchsichtiges Display mit einem Sichtfeld von 120° × 45°, aber mit einer offenen Sicht von 72° vertikal.

Beide Headsets sind über ein Kabel mit dem für das Rendering verwendeten Computer verbunden. Für beide Headsets werden zwei VIVE-Basisstationen für die Kopfverfolgung verwendet. In der konventionellen Konfiguration (CON) verfügt das 2PASD über fünf TV Bildschirme mit jeweils 55 Zoll Bildschirmdiagonale, die zusammen ein Sichtfeld von 148° × 48° ergeben.

Für die verschiedenen MR-, VR- und AR-Konfigurationen, werden unterschiedliche Vermischungen aus realen und virtuellen Welten benötigt. In der VR-Konfiguration wurde das gesamte Cockpit mit seinem Inneren und der Pilot als Avatar visualisiert (Abbildung 4). Unter dieser VR-Konfiguration werden die Bewegungen der Steuerelemente und dementsprechend auch die Arm- und Beinbewegungen animiert. Es wurde jedoch keine Körper- oder Handverfolgung integriert. Die Flugaufgaben der Studie erfordern keine Interaktion mit dem Cockpit, da die Piloten beide Hände während des Manövers immer am Steuer haben.

Für die MR-Konfiguration wurde das virtuelle Cockpit angepasst, indem die Cockpitanzeigen und die Bedienelemente herausgenommen wurden. Anstelle der virtuellen Cockpitinstrumente wird das 2PASD-Cockpit-Mockup inklusive der Bedienelemente und der Anzeigen des Primary Flight Displays (PFD) (Abbildung 5) verwendet. Für diese Konfiguration wird Chroma Key verwendet. Überall um die Pilotensitze, die 2PASD-Displays für die Cockpitinstrumente und die Bedienelemente wurde ein Greenscreen installiert (Abbildung 6). Überall dort, wo die Farbe Grün von den Kameras des Headsets eingefangen wurde, zeigt das gerenderte Bild VR. Überall sonst wird das Bild der Kamera angezeigt. Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt der MR-Konfiguration ist die Beleuchtungseinstellung. Die MR-Konfiguration zeigt die beste Leistung, wenn der Greenscreen und das 2PASD Mockup hell beleuchtet sind. Nichtsdestotrotz, sollten Schatten und Reflexionen auf den Displays vermieden werden.



Abbildung 4: VR Konfiguration

© DLR. CC BY-NC-ND



Abbildung 5: MR Konfiguration

© DLR. CC BY-NC-ND



Abbildung 6: Chroma Key Aufbau für Mixed Reality Konfiguration © DLR. CC BY-NC-ND

Das Headset von JVC wurde für die AR Konfiguration verwendet. Es ist so implementiert, dass die virtuelle Realität nur in den Fenstern des Hubschraubers angezeigt wird, alles andere ist transparent. Wenn sich also die Hände innerhalb des definierten Fensterbereichs befinden, werden sie von den virtuellen Bildern verdeckt und sind für den Piloten nicht mehr sichtbar.

Die TV-Displays zeigten die gleichen visuellen Hinweise (3D Modelle), nur dass sie mit OpenGL gerendert wurde. Die fünf TV-Displays sind wie folgt angeordnet: Zwei Displays sind jeweils links und rechts vertikal positioniert und das fünfte Display ist horizontal in der Mitte angeordnet.

Durchführung der Pilotenkampagne:

Es wurden vier verschiedene Simulationskonfigurationen bewertet (siehe Tabelle 2). In dieser Studie repräsentiert die AR-Konfiguration das Setup mit durchsichtigem Headset (JVC HMD-VS1D). Die Varjo XR-3 wurde für die MR- und VR-Konfiguration verwendet. Der 2PASD mit der konventionellen Konfiguration mit den fünf TV-Displays wird zum Vergleich herangezogen.

Tabelle 2: Übersicht der getesteten Konfigurationen

Konfigurationen	JVC	Varjo XR-3	TV Displays
Konventionell (CON)	-	-	X
Virtual Reality (VR)	-	X	-
Mixed Reality (MR)	-	X	-
Augmented Reality (AR)	X	-	-

Für die Vergleichbarkeit wurden die Piloten gebeten, einen Schwebeflug und ein Slalom-Manöver zu fliegen, die auf den Mission-Task-Elementen (MTE) von ADS-33 [13] basieren. Das Schwebeflugmanöver sollte eingeleitet werden mit einer Geschwindigkeit von 6 bis 10 Knoten und einer Höhe von weniger als 20 Fuß. Mit einem Steuerkurs in Richtung Süden fliegt der Pilot 45° relativ zum Kurs des Hubschraubers zum Schwebepunkt. Wenn der Pilot den Schwebepunkt erreicht, wird er gebeten, die die Schwebeposition für 30 Sekunden zu halten.

Das Slalom-Manöver beginnt direkt mit einem stabilen Flug mit 60 Knoten. Nach dem ersten Tor beginnen die Piloten mit dem Slalomkurs. Dazu müssen die Piloten vier gleichmäßige Kurven im Abstand von 500 Fuß fliegen. Um dieses Manöver durchzuführen, wurden visuelle Hinweise für jedes Manöver in den MTE-Parkour für das Szenario integriert (Abbildung 7).

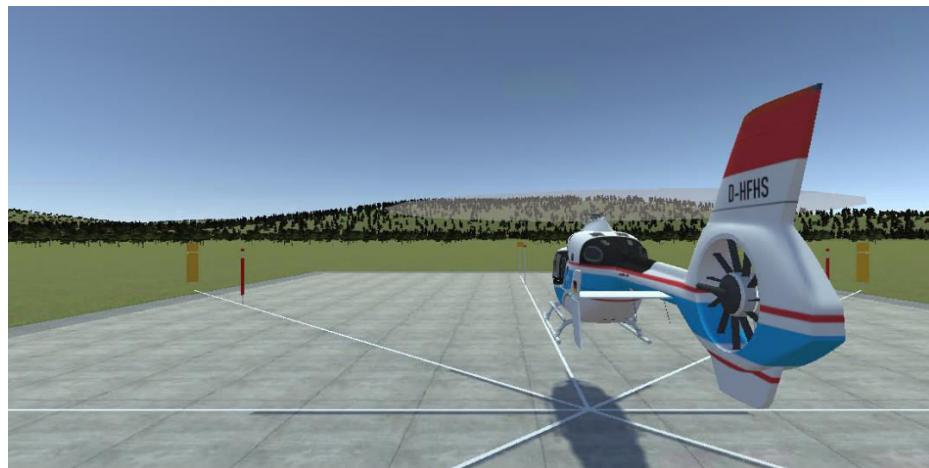


Abbildung 7: Schwebeflug MTE mit visuellen Hinweisen © DLR. CC BY-NC-ND

Das Schwebemanöver wurde ausgewählt, um unter anderem die Auswirkungen der visuellen Systeme auf das peripherie Sehen des Piloten zu untersuchen. Das Slalom-Manöver wurde gewählt, weil bei diesem Manöver sich der Hubschrauber schnell und nahe am Boden bewegt, so dass viele Bewegungen im Bild des Headsets angezeigt werden, die die zum Beispiel schneller zu Simulationskrankheit führen könnten. Beide, das Schwebeflugmanöver und das Slalommanöver, wurden jeweils dreimal in jeder Konfiguration geflogen.

Bewertungsmethoden:

Für die Bewertung wurden verschiedene Bewertungstechniken angewandt. Auf der einen Seite wurden standardisierte subjektive Bewertungsmethoden verwendet: der Fragebogen zur Präsenz (Presence Questionnaire (PQ)) [3] und der Fragebogen zur Simulationskrankheit (Simulation Sickness Questionnaire (SSQ)) [14]. Darüber hinaus wurden in der Nachbesprechung einige ergonomische Fragen gestellt. Auf der anderen Seite wurden zur objektiven Bewertung Flugdaten aufgezeichnet, um die die Erfüllung der Flugaufgabe der einzelnen Piloten in den verschiedenen Konfigurationen zu vergleichen. Zusätzlich sind noch Blickbewegungsdaten mit der Tobii Pro Glasses 3 aufgenommen worden. Weitere Infos zu den Bewertungsmethoden ist in AP320 aufgeführt.

Pilotenerfahrung:

Insgesamt haben drei Hubschrauberpiloten an der Kampagne teilgenommen (siehe Tabelle 3). Alle waren mit durchsichtigen und monitorbasierten Headsets vertraut. Zwei von ihnen sind Hubschrauber-Testpiloten.

Tabelle 3: Übersicht Pilotenerfahrung

Pilot	Gesamtflugstunden	Testpilot	VR/MR/AR Erfahrung
A	6850 h	Ja	Ja
B	850 h	Nein	Ja
C	1500 h	Ja	Ja

Ergebnisse:

Präsenz

In Abbildung 8 ist die Gesamtpunktzahl (Total Score (TS)) der PQ für die Slalomaufgabe für alle Piloten (Pilot A, B und C) dargestellt. Die Visualisierung des PQ-Scores ist aus [15] adaptiert, in der eine Benotungsskala zum PQ-Score hinzugefügt wird, um das System zusätzlich im Hinblick auf die Benutzerfreundlichkeit zu bewerten. Eine Bewertungsskala, die unter 50 % des PQ-Scores liegt, gilt als inakzeptabel, während in 10 %-Schritten über 50 % aufwärts als unbefriedigend, geringfügig, zufriedenstellend, sehr gut und ausgezeichnet eingestuft wird. In dieser Studie wurden die Fragen zum Ton ausgeschlossen, da kein Ton verwendet wurde.

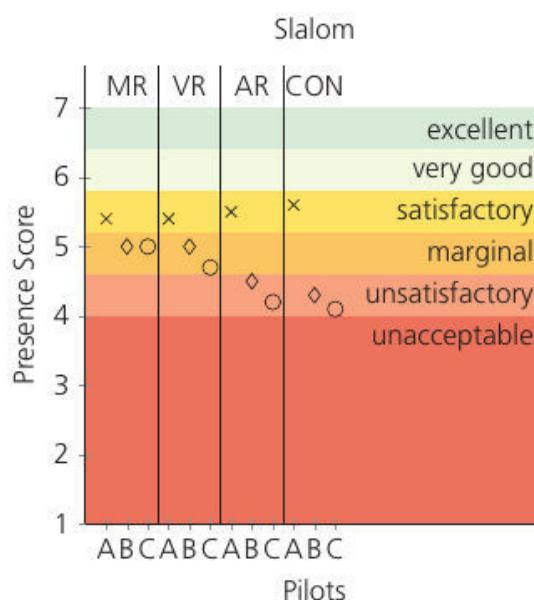


Abbildung 8: PQ Gesamtpunktzahl für Slalom für alle Piloten

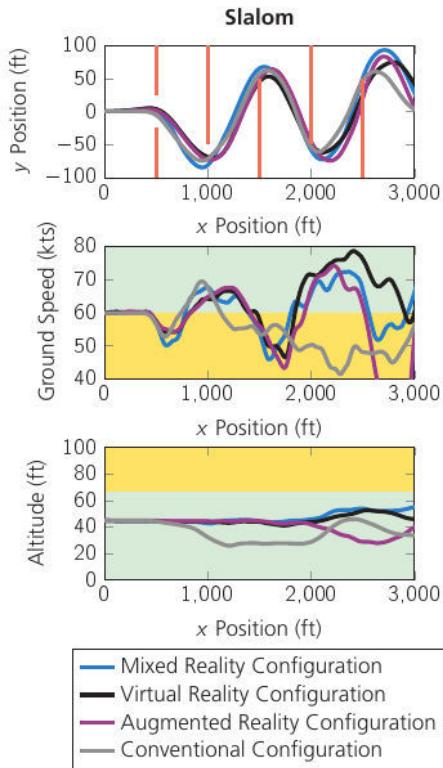
Pilot B und C bewerteten die MR-Konfiguration beide mit einer Punktzahl von 5 von 7 für die PQ-Gesamtbewertung (Abbildung 8). Beide Piloten gaben an, dass sie diese Konfiguration bevorzugen, da die Immersion sowie die virtuelle Welt hier am besten dargestellt werden.

Auch die VR-Konfiguration wird von Pilot B mit 5 und von Pilot C mit 4,7 bewertet. Dennoch erklärte Pilot B, dass er es vorzieht, seine realen Hände im Cockpit zu sehen. Die AR-Konfiguration wurde von den Piloten B und C schlechter bewertet. Alle Piloten gaben an, dass das kleine Sichtfeld von 45° horizontal des durchsichtigen Displays nicht ausreicht, um sich völlig in das Geschehen einzutauchen. Pilot A verglich es mit den kleinen Fenstern eines Flugzeugcockpits, während Hubschraubercockpits ein größeres Sichtfeld aus dem Fenster bieten. Die Bewertungen von Pilot B und C für die konventionelle Simulation mit den TV-Bildschirmen sind 4,3 bzw. 4,1. Alle Piloten kommentierten, dass die virtuelle Welt in den Headsets dreidimensionaler erscheint als auf den TV-Displays. Pilot A bevorzugte ebenfalls die MR-Konfiguration. Das Feedback von Pilot A spiegelt sich jedoch nicht in den PQ-Scores wieder. Pilot A erklärte, dass nicht alle Fragen des Fragebogens für die Beurteilung des Hubschrauberszenarios besonders geeignet sind. Der PQ wurde entwickelt, um die Präsenz in einer virtuellen Welt zu messen. Allerdings sind die Fragen sehr allgemein formuliert. Für eine bessere Nutzung des PQ im Kontext einer Hubschraubersimulation sind möglicherweise einige Anpassungen an den Fragen erforderlich oder ein detaillierteres Briefing zu dem Fragebogen. Die PQ-Werte der anderen Piloten (Pilot B und C) scheinen mit ihren Kommentaren übereinzustimmen.

Simulationskrankheit

Die Ergebnisse der SSQ zeigen, dass nur Pilot C mit der MR-Konfiguration mit einer Gesamtpunktzahl von 11 von 236 Punkten Symptome bei dem Schwebeflugmanöver aufgetreten sind. Die beiden anderen Piloten A und B bewerteten alle Konfigurationen ohne Symptome. Pilot C bewertete leichtes Unbehagen und leichten Schwindel (offene Augen) während des Schwebeflugmanövers nur für die MR-Konfiguration. Die Symptome traten nur für kurze Zeit auf, als Pilot C aus dem Tiefflug in den Schwebeflug überging. Aufgrund des raschen Manövriertens in der Übergangsphase zum Schwebeflug machte der Hubschrauber eine Rollbewegung, die zu schnell bewegten Bildern der Umgebung führte, die im Headset angezeigt wurden. Die Bewertung hängt nicht unbedingt nur mit der MR-Konfiguration zusammen. Diese Symptome könnten auch in den anderen Konfigurationen auftreten sein, wenn das Manöver auf die gleiche Weise durchgeführt worden wäre. Alles in allem traten in dieser Studie nur in der MR-Konfiguration leichte Symptome bei Pilot C auf, indem er ein dynamisches Manöver durchführte, während die beiden anderen Piloten A und B keine Symptome aufwiesen.

Objekte Bewertung der Flugaufgabe



Da die Flugleistungen aller Piloten vergleichbare Ergebnisse zeigen, werden die Flugleistungen von Pilot B als Beispiel gezeigt. Abbildung 9 zeigt die beste Flugleistung gemäß den MTE-Leistungsparametern des Schwebeflugmanövers, ausgewählt aus drei Durchläufen, für jede Konfiguration MR, VR, AR und CON von Pilot B. Wenn die Daten innerhalb des grünen Bereichs des Diagramms liegen, hat der Pilot seine Leistung innerhalb der gewünschten (desired) Grenzen erbracht. Der gelbe Bereich markiert die angemessenen (adequate) Grenzen. In den beiden oberen Diagrammen wird die x- und y-Position über die Zeit visualisiert. Pilot B hat es geschafft, innerhalb der gewünschten Parameter für die MR-, VR- und AR-Konfiguration zu bleiben. Mit der CON-Konfiguration liegt die Leistung innerhalb der angemessenen Grenzen. Pilot B war auch in der Lage, die Höhe mit allen Konfigurationen innerhalb der gewünschten Grenzen zu halten. Nichtsdestotrotz schwankte der Kurs innerhalb der angemessenen Grenzen.

Abbildung 9: Objektive Daten der Schwebeflugmanövers von Pilot B

Unter Berücksichtigung aller Leistungen aller Piloten in Bezug auf den Kurs des Schwebeflugmanövers, waren die Piloten am meisten herausgefordert, den Kurs mit der CON-Konfiguration zu halten. In fast allen Konfigurationen gaben die Piloten an, dass ihnen die periphere Sicht beim Schwebeflugmanöver fehlt. Aufgrund der eingeschränkten Sicht waren mehr Kopfbewegungen notwendig, um die visuellen Hinweise zu sehen. Bei der MR, VR- und AR-Konfiguration machten die Piloten zusätzlich die Erfahrung, dass mit der Bewegung des Kopfes das Bild kurzzeitig verschwamm.

Ableitung von Anforderungen an die Simulationsstudie:

Ergebnisse der Mixed Reality Konfiguration

Zusätzlich zu einem minimalen Simulatorcockpit, bestehend aus Sitzen, Bedieneinheiten und Displays, benötigt die MR-Konfiguration ein MR-Headset, eine Green Box, Head Tracking und Lichtquellen, um eine immersive Erfahrung zu bieten. In der Studie traten aufgrund des Chroma-Key einige Bildartefakte auf. Außerdem gab es einige Reflexionen auf dem PFD aufgrund der zusätzlichen Lichtquellen. Die Piloten gaben außerdem an, dass das Bild bei schnellen Kopfbewegungen etwas unscharf wurde. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Leistung der Kopfverfolgung (Head Tracking) und des Computers, der für das Rendering verwendet wird. Beide müssen gut funktionieren, damit das Bild im Headset ohne spürbare Latenzzeit angezeigt wird. Die MR-Konfiguration könnte durch Maskierung des Cockpitbereichs optimiert werden, um Artefakte zu vermeiden. Alle Piloten gaben an, dass das MR-Headset in Kombination mit einem Hubschraubersimulator für die Ausbildung von Hubschrauberpiloten geeignet ist und diese Konfiguration favorisieren.

Ergebnisse der Virtual Reality Konfiguration

In dieser Studie wird ein vollständig virtuelles Cockpit mit einem Avatar ausgestattet, der entsprechend den Steuereingaben animiert wird. Darüber hinaus, erforderte die Konfiguration auch eine Kopfverfolgung. Da die Piloten während des Manövers nicht mit dem Cockpit interagieren mussten, ist die Konfiguration ausreichend, um erste Erkenntnisse zu gewinnen. Ein Vorteil der VR-Konfiguration im Vergleich zur MR-Konfiguration ist, dass die Fluginstrumente besser ablesbar waren. Die VR-Konfiguration kann verbessert werden, indem der Avatar mit Body Tracking verbessert werden. Eine weitere Herausforderung ist das haptische Feedback, wenn die Piloten mit den Tasten im Cockpit. Es könnte von Vorteil sein, ein physisches Hubschraubercockpit zu verwenden oder haptische Handschuhe einzusetzen, um das immersive Erlebnis zu verbessern. Ein detaillierteres virtuelles Cockpit mit vollständig voll ausgestatteten Fluginstrumenten wäre für das Hubschrauber Flugtraining ebenfalls notwendig. Die Piloten wiesen darauf hin, dass die VR-Konfiguration, wie die MR-Konfiguration das Potenzial für die Ausbildung von Hubschrauberpiloten hat, auch wenn die MR-Konfiguration für sie immersiver war.

Ergebnisse der Augmented Reality Konfiguration

Für diese Studie wurde das JVC-Headset für die AR-Konfiguration verwendet. Die Piloten berichteten, dass die virtuelle Welt die reale Welt nicht vollständig überlagert, so dass die reale Welt viel präsenter ist als die virtuelle Welt. Darüber hinaus gingen die Meinungen über die Lesbarkeit der Bildschirme unter den Piloten auseinander. Die Lesbarkeit hing auch von der Helligkeit der Umgebung ab. Um diese AR-Konfiguration zu optimieren, konnte ein geschlossenes Mockup mit nicht reflektierender Textur unerwünschte Reflexionen und Objekte der realen Welt im Bild verhindert werden. Auch die Beleuchtungsstärke wirkt sich auf die Lesbarkeit der Cockpit-Instrumente aus. Ein weiteres Thema ist das kleine vertikale Sichtfeld des JVC Headsets. Die eingeschränkte Sicht reduziert die Präsenz in dieser Konfiguration. Alle Piloten gaben an, dass das JVC-Headset weniger immersiv und weniger geeignet für die Durchführung des Testmanövers ist als das Varjo-Headset.

Fazit

Aufgrund der Ergebnisse der Vorevaluation ist für die anstehende Studie das Varjo Headset ausgewählt worden. Ebenfalls ist die Nutzung von Chroma Key für ein optimales MR-Erlebnis empfohlen worden.

6.6 AP 250 Testen und Validierung des AR/XR Gesamtsystems

Mit den bereits gewonnenen Erfahrungen aus der Vorevaluation (siehe auch [16]), hat eine Wissenschaftlerin des DLR bei der Validierung des ARiTtra Simulators unterstützt. Vorort ist die Wissenschaftlerin des DLR den Studienablauf mit einem DRF Piloten auf dem ARiTtra Simulator durchgegangen um zu überprüfen, ob alle Funktionen für die geplanten Trainingsmissionen vorhanden sind. Ebenfalls flog der DRF-Pilot bei der Validierung von dem ARiTtra Simulator beide Aufgaben. Bei der „Ground Work“ (siehe auch AP 310) Aufgabe gab er an, dass es vorteilhaft wäre, mit der Platzrunde zu beginnen. Somit können die Piloten sich zunächst auf die Platzrunde konzentrieren, ohne bereits die anspruchsvollen Manöver in Bodennähe geflogen zu sein und möglicherweise bereits Symptome der Simulationskrankheit wie Übelkeit zu haben. Dies ermöglicht es ihnen, die Platzrunde ohne Symptome durchzuführen und auch sich wieder kurz eingewöhnen zu können, bevor sie sich mit anspruchsvoller Manövern in der Nähe des Bodens fliegen.

Dieser Vorschlag wurde umgesetzt, indem in der „Ground Work“ Aufgabe nun zuerst die Platzrunde geflogen wird und anschließend dann die Manöver am Boden von den Piloten geflogen werden sollen.

Neben der Rückmeldung zu den entwickelten Flugaufgaben gab der Pilot auch Rückmeldung zu dem ARiTtra Simulator. Die entsprechenden auf der Rückmeldung des Piloten durchgeführten Änderungen sind ebenfalls für den ARiTtra Simulator berücksichtigt worden.

6.7 AP 310 Entwicklung von Trainingsmissionen für die Simulatorstudie

In Vorbereitung für die Entwicklung der Trainingsmissionen für die vergleichende Simulationsstudie wurden Interviews mit zwei Piloten sowie dem ehemaligen Leiter eines großen Hubschraubertrainingszentrums in Deutschland durchgeführt.

Von den Piloten wurde bei derzeitigen Simulatoren die Simulationsgüte mit besonderem Fokus auf die Sichtsimulation kritisiert. Dabei erwähnten sie explizit die mangelhafte Höhenabschätzung. Neben weiteren Faktoren hatte dies einen großen Einfluss auf das Training von Notverfahren während Standardsituationen. Notverfahren (wie Autorotation, Triebwerksausfall, Heckrotorprobleme) werden im Simulator Training viel geübt, deshalb sollten diese auch realistisch in der Simulation dargestellt werden.

Definition der Flugaufgabe:

Die derzeitigen Anforderungen an den Hubschrauber Trainingssimulator sind in der Spezifikation FSTD(H) festgehalten [1]. Nichtsdestotrotz, ändern sich ständig die Anforderungen an die Hubschrauberpiloten und die Hubschraubermissionen. In den neustens Änderungen der Anforderungen werden die Funktionen der Hubschraubersimulatoren in sogenannte „signature capabilities“ eingeordnet [17]. Je nach Trainingszweck müssen diese entsprechend erfüllt werden. Um die meisten Funktionen/„signature capabilities“ in einem Flug unterzubringen, bietet sich der Checkflug an. Den Checkflug oder auch „proficiency check“ genannt, müssen Piloten einmal im Jahr beispielweise zur Erhaltung des Type Ratings durchführen um zu zeigen, dass sie noch im Stande sind den Hubschraubertyp sicher fliegen zu können. Der Checkflug beinhaltet neben Standverfahren auch die Notfallverfahren. Daraus wurden folgende Flugaufgaben abgeleitet:

Flugaufgabe für die Studie:

1) Gewöhnungsflug:

Die Piloten sollen die Möglichkeit haben, sich mit dem Simulator vertraut zu machen.

2) Aerial Work (Abbildung 10):

Es soll ein Flug vom Start (Starten des Hubschraubers nach Checkliste) bis Abstellen des Hubschraubers durchgeführt werden. Bei diesem Flug sollen in einer Flughöhe von ca. 1500-3000 ft (über Grund) Flugaufgaben durchgeführt werden (von 180° Kurve, Steig- und Sinkflug bis bspw. ein Quickstop). Mindestens ein Notfallverfahren (z.B. One Engine Inoperative (OEI)) soll mit eingebaut werden.

3) Ground Work (Abbildung 11):

Bei diesem Flug sollen Flugaufgaben in unmittelbarer Bodennähe innerhalb des Mission-Task-Element (MTE) Parkour durchgeführt werden. Hierbei werden visuelle Hinweise dem Piloten zu Verfügung gestellt, um Schwebeflugaufgaben als auch bspw. laterales Versetzen des Hubschraubers (reproduzierbar) durchführen zu können.

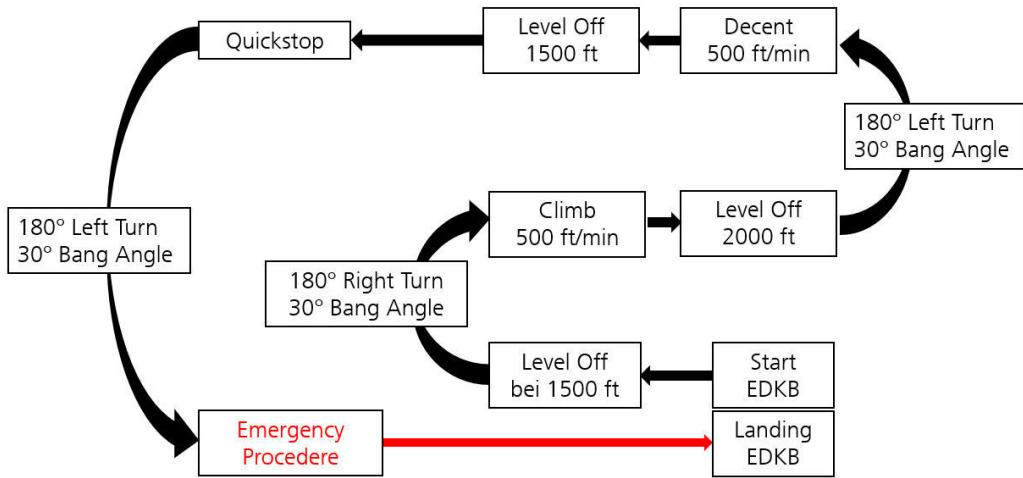


Abbildung 10: Aerial Work © DLR. Alle Rechte vorbehalten.

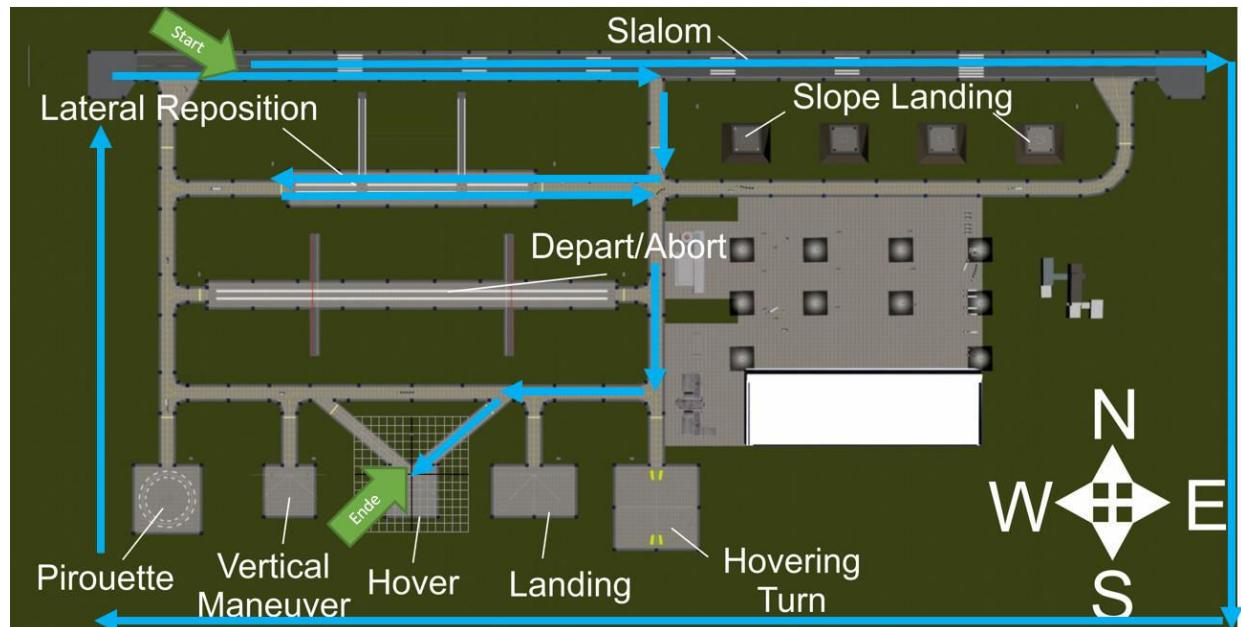


Abbildung 11: Ground Work © DLR. Alle Rechte vorbehalten.

6.8 AP 320 Entwicklung einer Bewertungsmethodik

Für die Bewertung sollen verschiedene Bewertungstechniken angewandt werden. Auf der einen Seite sollen standardisierte/ adaptierte subjektive Bewertungsmethoden in Form von Fragebögen verwendet werden und auf der anderen Seite sollen Blickbewegungsdaten und objektive Daten (Flugzustandsdaten) erhoben werden für den Vergleich des Mixed Reality Hubschraubersimulators und einem FFS.

Fragebögen

In Tabelle 1 ist eine Übersicht von standardisierten Fragebögen, die für die Pilotenkampagne in Betracht gezogen wurden. Folgende Faktoren sollten bewertet werden: Simulations-/Bewegungskrankheit, Immersion, Ergonomie und Arbeitsbelastung.

Tabelle 4: Übersicht standardisierter Fragebögen

Simulation Sickness/ Motion Sickness	Immersion	Ergonomie	Arbeitsbelastung
Simulation Sickness Questionnaire (SSQ)	Presence Questionnaire (PQ, Wittmer Misery Scale (MISC))	Mixed Reality Questionnaire (MRCQ)	Bedford Rating Scale
Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ)	Steed Presence Questionnaire (SUS, Slater)	Comfort Rating Scale (CRS)	NASA TLX
	Igroup Presence Schubert)		

Bewertung von Präsenz

In der Literatur wird das Gefühl der Präsenz als Schlüsselfaktor für die Faktor für die Bewertung von virtuellen Umgebungen zu sein [18]. Es gibt jedoch unterschiedliche Definitionen von Präsenz und auch mehrere Fragebögen zu seiner Bewertung. Der am häufigsten verwendeten Fragebogen ist der Presence Questionnaire von Wittmer und Singer. Sie definieren Präsenz als "die subjektive Erfahrung, an einem Ort oder in einer Umgebung zu sein, auch wenn man sich physisch an einem anderen Ort befindet" [3]. Der Fragebogen besteht aus 32 Fragen. Der PQ verwendet eine Sieben-Punkte-Skala. Ein weiterer häufig verwendeter Fragebogen ist der Fragebogen von Slater Usao und Steed (SUS) [19]. Dieser Fragebogen besteht aus sechs Fragen, die darauf abzielen, die Präsenz in Bezug auf reale Erfahrungen zu bewerten. Ein dritter häufig verwendeter Fragebogen ist der Igroup Presence Questionnaire [20]. Dieser Fragebogen besteht aus 14 Fragen aus verschiedenen Fragebögen, auch von Wittmer et. al. und Slater et. al., und eigenen Fragen.

Bewertung von Simulationskrankheit

Bei der Verwendung von VR- und MR-Headsets kann die Simulationskrankheit auftreten. Informationen aus verschiedenen Sinnesorganen werden für den menschlichen Orientierungssinn verwendet. Alle Sinnesinformationen werden verarbeitet, um die aktuelle Position und Bewegung im Raum zu bestimmen. Wenn jedoch die visuellen Informationen nicht mit den vestibulären Informationen übereinstimmen, entsteht ein sensorischer Konflikt. Dieser Konflikt kann zu Simulationskrankheit führen, wenn dieser Konflikt einige Zeit anhält. Für die Bewertung der Simulationskrankheit gibt es auch gibt es verschiedene Arten von Fragebögen. Der am weitesten verbreiteten Fragebogen ist der SSQ ([21],[22]). Der SSQ ist eine standardisierte Bewertungsmethode zur schnellen Bewertung von 16 körperlichen Symptomen die während einer Simulationsstudie auftreten können. Die Teilnehmer können ihre Symptome mit den verschiedenen Abstufungen „keine, leicht, mäßig und schwer“ bewerten. Ein ähnlicher Fragebogen ist die Misery Scale (MISC) [23]. Diese Skala macht sich das Wissen zunutze, dass der Übelkeit in der Regel andere Symptome vorausgehen, wie Schwindel, Kopfschmerzen, (kalter) Schweiß und Magengefühl, wobei die letztgenannten Symptome von Person zu Person in der Reihenfolge ihres Auftretens und ihrer Ausprägung variieren. Ein weiterer Fragebogen, der

nicht nur hinsichtlich der Simulationskrankheit, aber auch die Bewegungskrankheit berücksichtigt, ist der Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ) [24]. In diesem Fragebogen sollen die Teilnehmer von einer Skala von 1 (not at all) bis 9 (severely) in 16 Aussagen bewerten, wie sich fühlen.

Bewertung der Ergonomie

Zur Bewertung der Ergonomie von kopfgetragenen Sichtsystemen wurde bei einer ausführlichen Literaturrecherche der Comfort-Rating-Scale (CRS)-Questionnaire [25] als möglicherweise geeigneter Fragebogen identifiziert. Dieser bewertet die Ergonomie in den sechs Dimensionen *Emotion*, *Bindung*, *Schaden*, *wahrgenommene Veränderung*, *Bewegung* und *Ängste*. Da der Fragebogen ursprünglich auf Augmented Reality Assistenzsysteme ausgerichtet ist und einige wichtige Kategorien in der Bewertung fehlen, wurde die Entscheidung getroffen, einen eigenen Fragebogen zu entwerfen.

Der entwickelte Mixed Reality Comfort Questionnaire (MRCQ) nutzt als Basis die 21-Punkte-Skala des NASA Task Load Index (TLX)-Fragebogen [26] in Kombination mit dem Perceived Discomfort (RPE-D) der Borg-10-Punkte-Skala [27]. Der Fragebogen umfasst 11 Fragen in den Dimensionen *Comfort*, *Movement*, *Weight*, *Heat/Ventilation* und *Visual Experience*, wie in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Fragen des Mixed Reality Comfort Questionnaire (MRCQ)

Nr.	Fragestellung	Kategorie
1.1	Do you feel any overall discomfort with the device?	Comfort
1.2	Do you feel any discomfort from the adjustment options of the device?	Comfort
1.3	Do you feel any discomfort or pressure from the device or straps?	Comfort
1.4	Do you feel any discomfort due to physical symptoms (headache, pain, tension)?	Comfort
2.1	Do you feel any discomfort from restrictions in your head movement?	Movement
2.2	Do you feel any discomfort due to a changing device position on your head due to movement?	Movement
3.1	Does the weight of the device produce any discomfort?	Weight
3.2	Does the weight distribution produce any discomfort?	Weight
4.1	Does the heat development or temperature of the device produce any discomfort?	Heat/Ventilation
4.2	Does the ventilation of the device produce any discomfort?	Heat/Ventilation
5.1	Do you feel any discomfort with your eyes, e.g. focusing problems, blurriness or tears?	Visual Experience

Während der Vorevaluationskampagne im 2PASD-Simulator des DLR wurde der Fragebogen von drei Piloten im entwickelten Testszenario genutzt. Alle drei Piloten gaben die Rückmeldung, dass die Fragen des MRCQ als besser geeignet für moderne XR-Sichtsysteme seien als der CRS.

Bewertung der Arbeitsbelastung

Mithilfe der Bewertung der Arbeitsbelastung während der Flugaufgaben in beiden Simulatoren lassen sich Rückschlüsse auf die Simulationsgüte ziehen. Während sich bei einer vergleichbaren Simulationsgüte ohne nennenswerte Trainingseffekte keine Unterschiede in der wahrgenommenen Arbeitsbelastung ergeben, werden sich in der geplanten Simulatorkampagne voraussichtlich Unterschiede u.a. durch die Durchführung eines Manövers mit den unterschiedlichen Sichtsystemen ergeben. Zur Bewertung der Arbeitsbelastung soll während der Vergleichskampagne das Bedford-Workload-Rating verwendet werden [28]. Die verwendete 10-Punkte-Skala ist auf Basis eines Entscheidungsbaum aufgebaut und ermöglicht eine Bewertung der Arbeitsbelastung von „Workload insignificant“ bis „Task abandoned. Pilot unable to apply sufficient effort (10)“.

Blickbewegungsdaten

Während der Simulatorkampagne sollen die Blickbewegungen der Probanden aufgezeichnet werden. Mit den Blickbewegungen kann eine Analyse der Aufmerksamkeitsbereiche und Rückschlüsse auf die kognitive Belastung der teilnehmenden Probanden durchgeführt werden. Unterschiede in der Aufmerksamkeit und der kognitiven Belastung können auf signifikante Unterschiede in der Simulationsgüte der beiden Simulatoren hinweisen.

Für die Aufzeichnung der Blickbewegung wird in der Mixed Reality-Konfiguration die interne Aufzeichnung der Varjo XR-3 genutzt. In der klassischen Konfiguration (FSS) wird die Abbildung 12 abgebildete kopfgetragene Blickbewegungsaufzeichnungsbrille Tobii Pro Glasses 3 genutzt. Diese Eye Tracking Brille ermöglicht eine Aufzeichnung der Blickbewegung in einem FoV von 95° horizontal und 63° vertikal bei einer Aufzeichnungsrate von 50 Hz. Zudem kann über eine Szenekamera in der Mitte der Brille eine Videoaufzeichnung aus der Perspektive des Probanden inklusive Audiokanal aufgezeichnet werden.



Abbildung 12: Tobii Pro Glasses 3 Eye Tracking Brille © DLR. CC BY-NC-ND

Die aufgezeichneten Blickbewegungsdaten können mithilfe eines Algorithmus in Fixationen und Sakkaden klassifiziert werden. Anschließend kann das in-the-cockpit (ITC) / out-the-window (OTW) Verhältnis ermittelt werden.

Bewertung objektiver Daten

Da die Aufgaben klar definiert sind, können die geflogenen Manöver mit verschiedenen visuellen Systemen miteinander verglichen werden. Hierbei kann sich angesehen werden, ob das Sichtsystem einen Einfluss auf das fliegerische Verhalten hat. So kann beispielsweise das Sichtfeld eines VR/AR/MR Headsets das peripherie Sehen des Piloten einschränken, was beispielsweise einen großen Einfluss auf die Einschätzung des Piloten über die Lage/Orientierung des Hubschraubers haben kann.

6.9 AP 330 Vorbereitung eines klassischen FSTD für die Vergleichsstudie

In diesem Arbeitspaket hat das DLR den Projektpartner Reiser dabei unterstützt, den klassischen FSTD für die Vergleichsstudie vorzubereiten. Zum einen hat das DLR das 3D Modell des MTE-Testparcours zur Verfügung gestellt, um die erstellte Trainingsmission auch im FFS fliegen zu können. Zum anderen hat das DLR eine Auflistung der benötigten Daten erstellt, z.B. Flugzustandsdaten und Videodaten mit Audio, um im Anschluss der Vergleichsstudie die wissenschaftliche Auswertung durchführen zu können.

6.10 AP 340 Validierung des Trainingsszenarios auf dem klassischen FSTD

In 2023 wurden die folgenden Flugaufgabe erstellt, basierend auf den typischen Flugmanövern, die der Pilot einmal im Jahr im Checkflug absolvieren muss. Die Flugaufgaben wurden in März 2024 von DLR Piloten evaluiert. Zusätzlich ist ein DLR Testpilot als erster Pilot bei der LAT den Studienablauf im Dezember 2024 durchgegangen um mögliche Verbesserungsvorschläge noch zu geben um letzte Anpassungen vor der Studie machen zu können.

6.11 AP 410 Durchführung von Simulatorstudien mit Piloten

Die pilotierte Simulatorstudie wurde bei der LAT durchgeführt. Hierfür wurden von der LAT ein Platz in einer Simulatorhalle zwischen zwei FFS für den entwickelten ARiTtra-MR-Simulator sowie freie Slots auf einem EASA FSTD(H) Level D qualifiziertem H145 FFS zur Verfügung gestellt. Die beiden Simulatoren sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

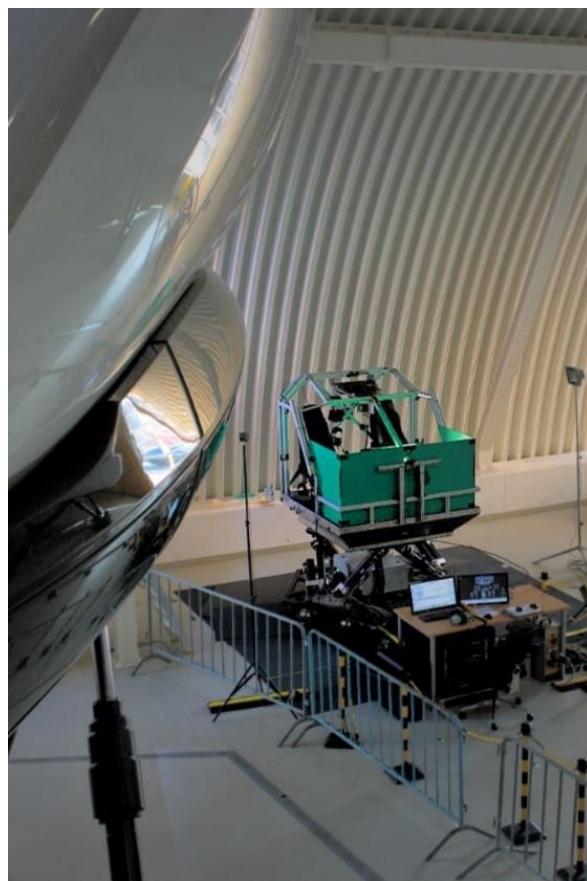


Abbildung 13: Im Projekt ARiTtra entwickelter MR-Simulator in einer Simulatorhalle bei der LAT

© DLR. Alle Rechte vorbehalten.

Für die Durchführung der Kampagne wurde aufgrund der Einbindung von menschlichen Probanden im Vorfeld eine Stellungnahme des DLR Ethikrates eingeholt. Eine positive Rückmeldung und Unbedenklichkeitserklärung erfolgten am 31.07.2024 unter dem Kennzeichen 20/24.



Abbildung 14: Cockpit des EASA FSTD(H) Level D qualifizierten H145-FFS bei der LAT
© DLR. Alle Rechte vorbehalten.

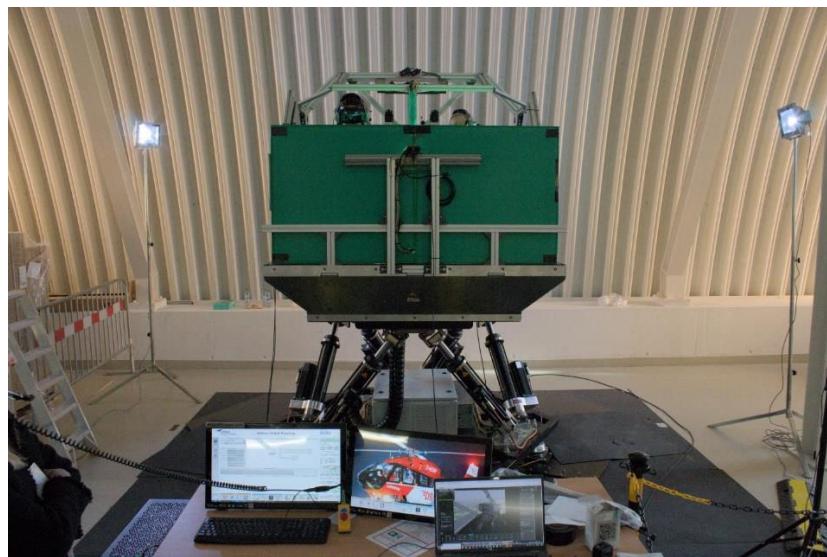


Abbildung 15: DLR Pilot in ARiTtra Simulator © DLR. Alle Rechte vorbehalten.

Für die Teilnahme an der Studie haben insgesamt 8 Piloten der DRF Luftrettung sowie ein Pilot des DLR teilgenommen.

Die durchgeführten Testpunkte während der Studien auf dem ARiTtra-Simulator und dem FFS sowie die verwendeten subjektiven Metriken sind in Tabelle 6 dargestellt.

Konfiguration	Flugaufgabe	Umgebung	Motion	Varjo	Tobii	Bewertungsmethode
Briefing	-	-	-	-	-	Datenschutz Einwilligungs-erklärung, Sicherheitseinweisung, biographischer Fragebogen, SSQ
ARiT	Gewöhnungsflug	Flughafen	X	X		SSQ, MRCQ
ARiT	Aerial Work	Flughafen	X	X		SSQ, MRCQ, BWR
ARiT	Ground Work	MTE Testparcour	X	X		SSQ, PQ, MRCQ BWR
Pause						
FFS	Gewöhnungsflug	Flughafen	X		X	SSQ
FFS	Aerial Work	Flughafen	X		X	SSQ, BWR
FFS	Ground Work	MTE Parkour	X		X	SSQ, PQ, BWR
Debriefing	-	-	-	-	-	Austausch

Tabelle 6: Testmatrix inkl. Bewertungsmethoden für die Studie

Während der Studiendurchführung konnte der Zeitplan eingehalten werden und es wurden die geplanten Bewertungsmetriken sowie Aufzeichnungen durchgeführt:

- Mixed Reality Comfort Questionnaire (MRCQ)
- Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)
- Bedford Workload Rating Scale (BWR)
- Eyetracking (Tobii Pro Glasses 3 bzw. Varjo XR-3)
- Cockpitcamera

Der DLR Pilot ist wie in AP 340 beschrieben, als erster Pilot durch die Studie durchgeführt worden. Aufgrund der Rückmeldung des Piloten wurde entschieden, dass keine weiteren Anpassungen für die Studie vorgenommen werden und der DLR Pilot mit seinem Studienlauf mit in die Ergebnisauswertung aufgenommen wird.

6.12 AP 420 – Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vergleichsstudie (FFS vs. MR ARiT Simulator) werden mit den folgenden Bewertungsmethoden ausgewertet: Simulation Sickness Questionnaires, Bedfort Rating Scale, Mixed Reality Comfort Questionnaires , Presence Questionnaire und Eyetracking.

Simulation Sickness Questionnaire

Der SSQ-Fragebogen wurde in der Kampagne zur Bestimmung von Symptomen der Simulations- oder Cyberkrankheit eingesetzt. Der Fragebogen wurde jeweils nach dem Abschluss einer Flugaufgabe/Konfiguration von den Probanden ausgefüllt.

Die Ergebnisse des SSQ-Fragebogens aufgeschlüsselt nach den Flugaufgaben/Konfigurationen und unterteilt in die Simulatorkampagnen im Dezember und Januar sind in Abbildung 16 dargestellt. Dort ist bei der Dezemberkampagne (rote Markierungen) ein hoher SSQ-Score in allen drei Flugaufgaben bei der Verwendung der Mixed Reality-Konfiguration (ARiTtra-Simulator) zu sehen. Insbesondere während der Flugaufgabe 2 „Aerial Work“ klagten die Piloten über Symptome der Simulatorkrankheit. Während der Flugaufgabe 3 „Ground Work“ gab es in der Dezemberkampagne einen Piloten, der die Flugaufgabe aufgrund von Schwindel und Übelkeit abgebrochen hat.

Aufgrund der Vielzahl der Symptome der Simulatorkrankheit, über welche alle Piloten in der Dezemberkampagne in der MR-Konfiguration klagten, wurde ein Re-Tuning der Bewegungsplattform beschlossen. Da das Auftreten der Symptome auf rotatorischer Hubschrauberbewegungen zurückgeführt werden konnte, wurde ein fehlerhafter Bewegungseindruck in den rotatorischen Achsen der Bewegungsplattform vermutet. Das Ergebnis des Re-Tunings war die Verringerung des Verstärkfaktors für die rotatorischen Beschleunigungen im Niedriggeschwindigkeitsbereich bis 20kt. Der positive Effekt dieses Re-Tunings auf Symptome der Simulatorkrankheit ist in Abbildung 16 in der Januarkampagne (blaue Markierungen) zu sehen. Der SSQ-Score hat sich in allen drei Flugaufgaben konstant um 20 ± 5 im Vergleich zur Dezemberkampagne verringert.

Das Ergebnis der SSQ-Bewertung zeigt die Sensibilität von Piloten in der MR-Konfiguration bezüglich ein feingetunten Bewegungsplatform und die Auswirkungen von fehlerhaften Bewegungseindrücken auf Symptome der Simulatorkrankheit.

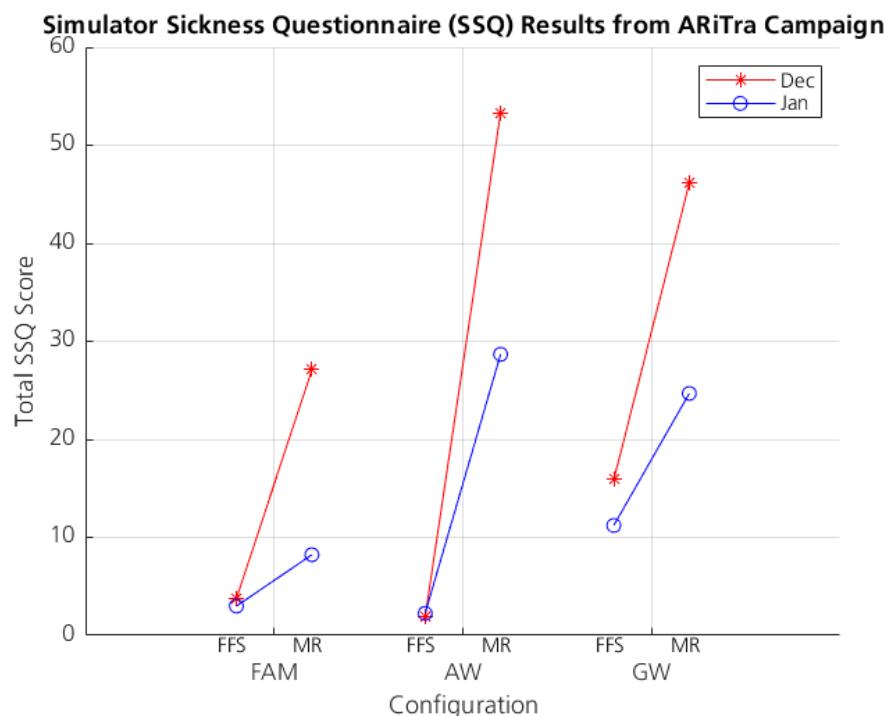


Abbildung 16: Bewertung der Simulatorkrankheitssymptome vor dem Tuning (Stern) und nach dem Tuning (Kreis)

Arbeitsbelastung (Bedford Workload Rating)

Das Ergebnis des Fragebogens zur Arbeitsbelastung (Bedford Workload Rating) ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Bewertungen sind für alle Piloten individuell in verschiedenen Farben dargestellt. Für beide Flugaufgaben ist mit zwei Ausnahmen eine Steigerung der Arbeitsbelastung durch die Verwendung der MR-Konfiguration feststellbar. Diese Steigerung beträgt für die MR-Konfiguration durchschnittlich 1 BWR, jedoch sind sechs Fälle mit einem stärkeren Anstieg bzw. einer konstanten oder sogar verringerten Arbeitsbelastung erkennbar (in der Flugaufgabe 2 „Aerial Work“).

Als Ergebnis der Bewertung der Arbeitsbelastung kann festgehalten werden, dass die MR-Konfiguration eine Steigerung der Arbeitsbelastung verursacht. Dies muss bei der Entwicklung von Trainingsaufgaben betrachtet werden, da bei herausfordernden Aufgaben u.U. die Belastung von Piloten in der MR-Konfiguration überschritten werden kann.

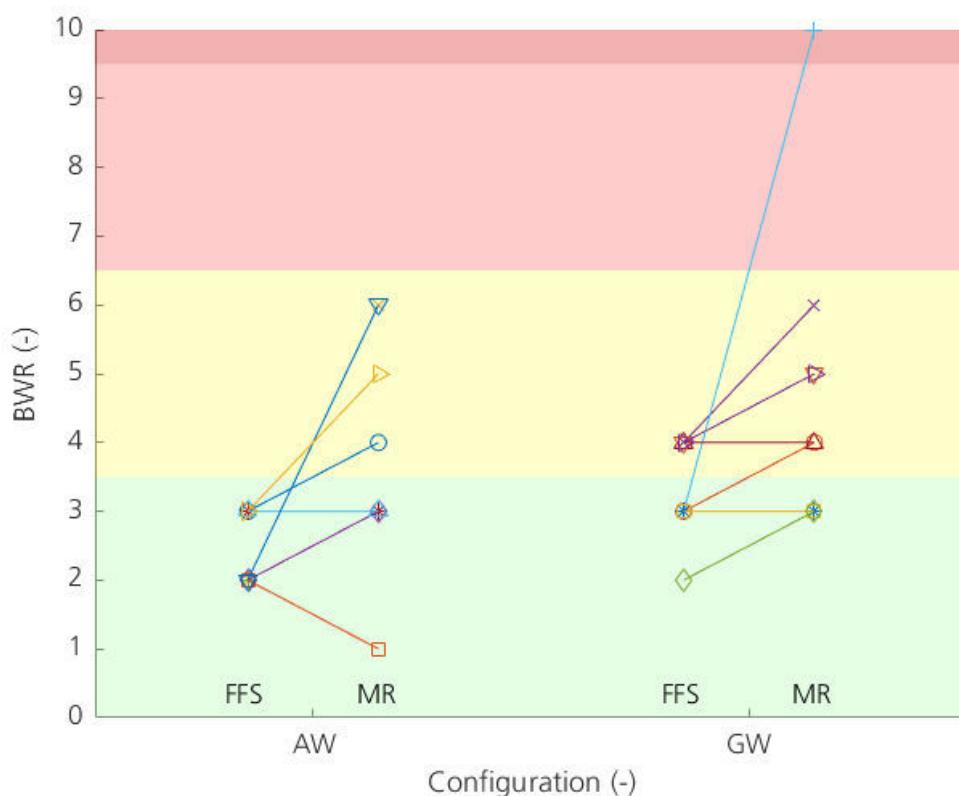


Abbildung 17: Arbeitsbelastung der Piloten- individuelle Auswertung

Komfort - Mixed Reality Comfort Questionnaire (MRCQ)

Zur Bewertung des Tragekomfort der MR-Brille wurde der eigens entwickelte MRCQ verwendet. Die Ergebnisse der Fragebögen sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Der mittlere Discomfort als Mittelwert aller Unterkategorien in Abbildung 18 zeigt nur einen geringfügigen Anstieg über die Gesamtzeit der Kampagnen bei einer Tragedauer von ca. 1h. Es sind jedoch individuelle Abweichungen des empfundenen Discomfort erkennbar, in beiden Abbildungen beispielsweise durch Pilot 9. Wie in Abbildung 19 erkennbar ist, trägt der „Visual Discomfort“ hauptsächlich zur (negativen) Gesamtbewertung bei und hat damit die höchste Relevanz. Dieser wurde im Fragebogen über die Frage „Do you feel any discomfort with your eyes, e.g. focusing problems, blurriness or tears?“ definiert.

Als Ergebnis der Bewertung des Komforts kann festgehalten werden, dass eine Stunde Tragedauer keinen relevanten Discomfort bei den Piloten erzeugt. Der sensitivste Faktor für einen Discomfort ist jedoch die visuelle Dimension.

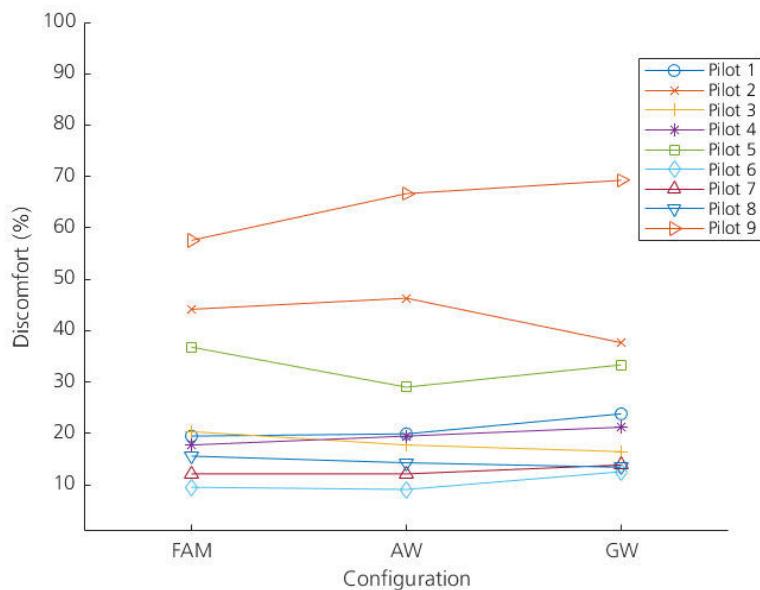


Abbildung 18: Overall Discomfort

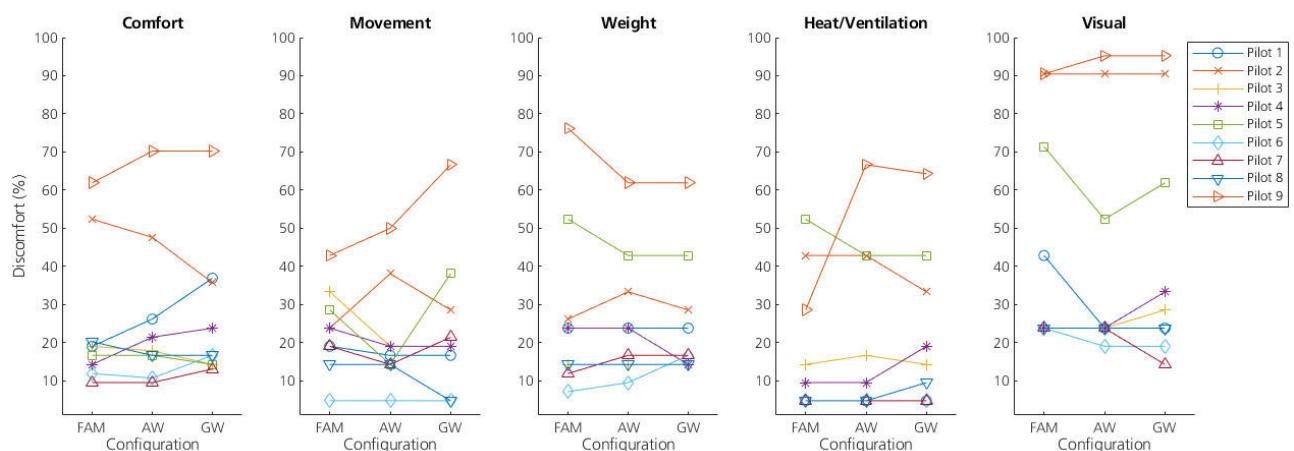


Abbildung 19: Ergebnisse der verschiedenen Kategorien von Komfort

Präsenz (Presence Questionnaire)

Für die Bewertung der Präsenz wurde der Presence Questionnaire von Witmer und Singer ([3]) verwendet. Dieser wurde nur einmal jeweils am Ende der drei Flugaufgaben im FFS und im ARiTtra Simulator ausgefüllt. Hier zeigt sich, dass der Median für den MR ARiTtra Simulator kurz unterhalb des Medians für die Präsenzbewertungen im FFS liegen. Dies zeigt, dass der ARiTtra Simulator schon nah an die Immersion des FFS sich annähert und somit starkes Potential hat für zukünftige Trainingssimulatoren für Hubschrauberpiloten mit Mixed Reality Headsets.

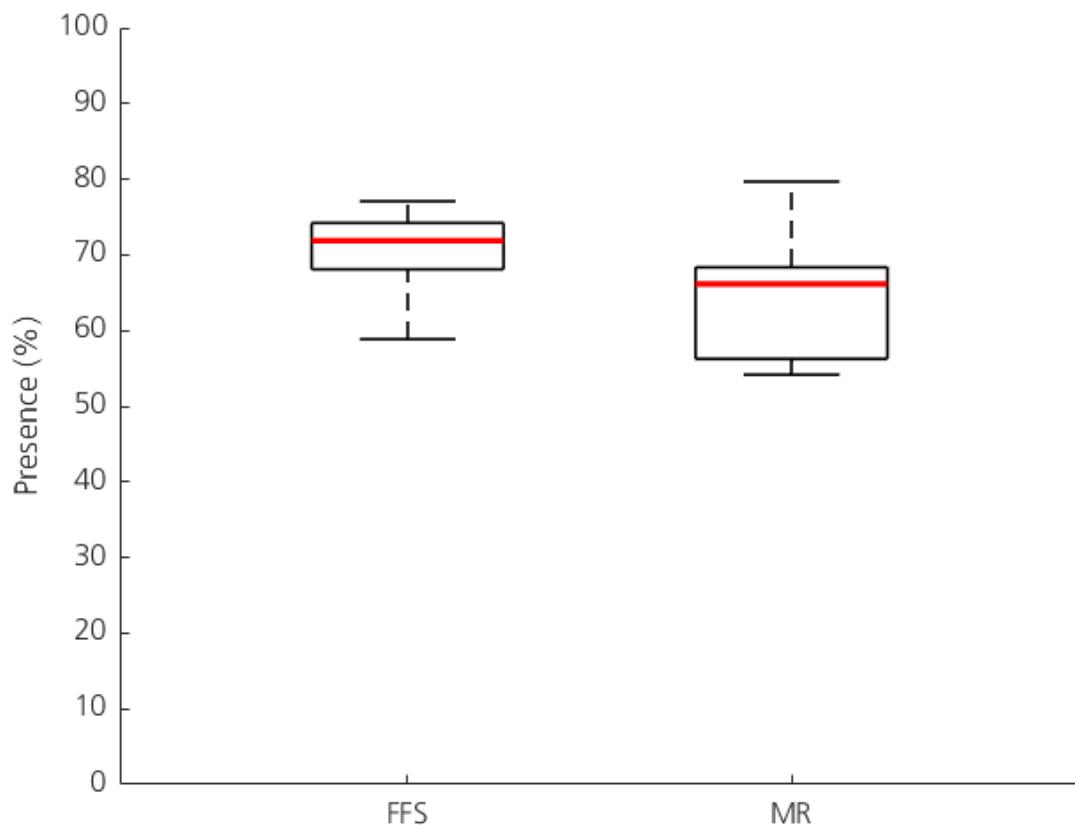


Abbildung 20: Ergebnisse des Präsenz-Fragebogens

Auswertung in-the-cockpit/outside-the-window Verhältnis

Bei der Eyetracking Auswertung war der Fokus auf der in-the-cockpit ITC/ OTW Verhältnis. Dies kann einen Hinweis auf unterschiedliche Scan Muster der Piloten in den Simulatoren geben. In Abbildung 21 zeigt sich der Trend, dass die Piloten vermehrt im FSS in das Cockpit geschaut haben. Grund dafür könnten zum einem sein, dass beim FFS das Originalcockpit mit all seinen Funktionen zur Verfügung stand und dies entsprechend wie gewöhnt genutzt wurde, während im ARItra Simulator die Systeme im Cockpit mit Touchpads zu bedienen waren und somit eine andere Eingabe durch Berührung (Touch) erforderten. Zum anderen haben die Piloten kommentiert, dass bei schnellen Kopfbewegungen mit dem MR Headset es zu verschwommenen Bildern kam und es Schwierigkeiten mit dem Fokus gab, sodass sie z.T. Kopfbewegung und den Blick ins Cockpit verringert/vermieden wurden. Hier zeigt sich, dass es durchaus noch Unterschiede im Blickverhalten zwischen den zwei Simulatoren gibt.

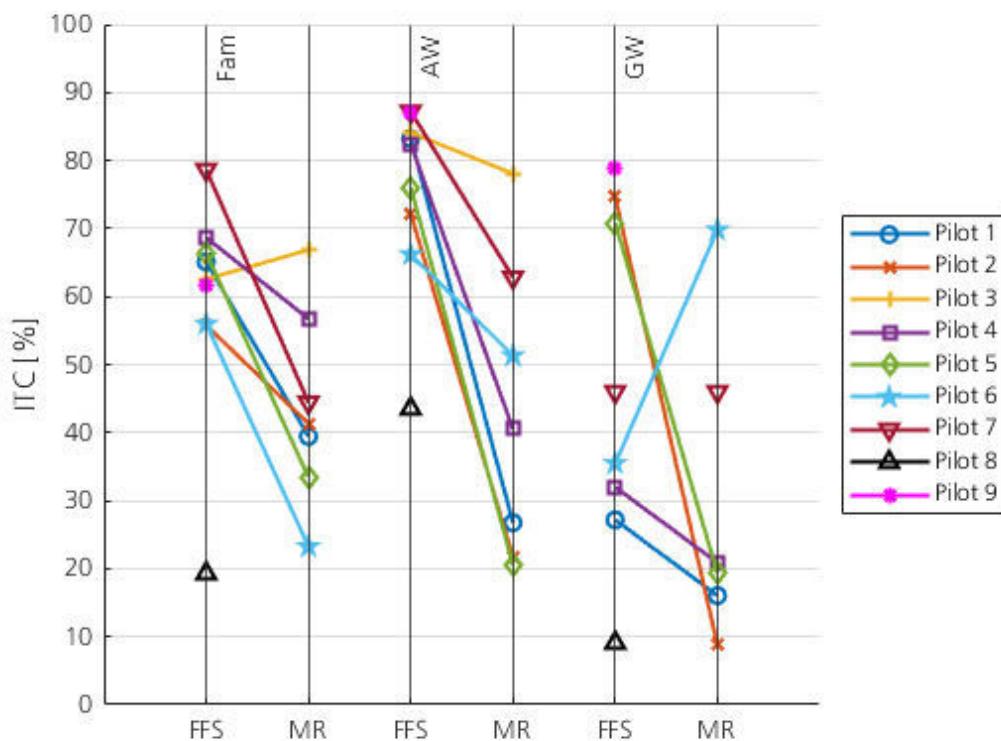


Abbildung 21: ITC-OTW Auswertung

6.13 AP 430 – Ableitung von Anforderungen an Qualifizierungsstandards für AR/XR-Trainingsgeräte

Auf Basis der Analysen und Ergebnisse der Simulatorkampagnen und den in Abbildung 16 - Abbildung 21 dargestellten Auswertungen wurde der Kontakt mit der luftfahrtgesetzgebenden Behörde in Deutschland, dem Luftfahrtbundesamt in Braunschweig aufgenommen, um Anforderungen an Qualifizierungsstandards abzuleiten. Für die in Deutschland qualifizierten Flugsimulationsgeräte ist das Referat L 5 „Flugsimulationsgeräte“ zuständig, welche u.a. für die Initialqualifikation und Reevalution von Flugsimulationsgeräten nach EASA FSTD(A) und (H) zuständig sind.

In Vorbereitung für das Meeting wurden die in AP 100 erarbeiteten Voraussetzungen und Anforderungen sowie die identifizierten Herausforderungen bei der Validierung und der Vergleichskampagne aufgearbeitet. Das Meeting mit 5 Mitarbeitern des LBA fand am 25.08.2025 am Standort des DLR Braunschweig statt. Der Fokus des Meetings lag auf dem Wissenstransfer bezüglich des grundlegenden Wissens zum Betrieb von AR-/XR-Brillen in Hubschraubersimulatoren sowie von Anforderungen, welche Betreiber zum Erreichen einer „Special Conditions“-Qualifizierung erreichen müssen. Diese Anforderungen werden nach Veröffentlichung in den kommenden Jahren nach Weiterbearbeitungen auch in allgemeine Qualifizierungsstandards der EASA übertragen werden.

7 Nutzen und Verwendbarkeit

Die Verwertungsperspektiven des Projektes ARiTа umfassen vielfältige Aspekte, die sowohl die Wissensverbreitung als auch die Stärkung der Kompetenzen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Bereich der Hubschrauber-Simulation beinhalten.

Zunächst wurde über den Qualifizierungsprozess von Mixed Reality-Simulatoren mit der Luftfahrt-Bundesamt (LBA) ausgetauscht. Dieser Austausch trägt dazu bei, die Anforderungen und Standards für Mixed Reality-Simulatoren im Bereich des Pilotentrainings zu definieren und zu sicherzustellen, dass diese Technologie für die zukünftige Ausbildung von Hubschrauberpiloten verfügbar ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des ARiTа-Projektes. Dies soll sicherstellen, dass die wissenschaftlichen und technischen Fortschritte, die im Projekt erzielt wurden, der Forschungs- und Wissenschaftsgemeinschaft, der Luftfahrtindustrie und anderen relevanten Interessengruppen zugänglich gemacht werden.

Darüber hinaus werden die Kompetenzen des DLR im Bereich der Hubschrauber-Simulation gesichert. Durch die erfolgreiche Durchführung des Projektes kann das DLR seine Position als führendes Institut für die Forschung und Entwicklung von Simulationstechnologien im Luftverkehr weiter ausbauen.

Schließlich wird durch das ARiTа-Projekt die Kompetenz des DLR im Bereich der Mixed Reality für die Hubschrauber-Trainingssimulation erweitert. Dieser Erweiterung der Kompetenzen kann zu neuen Forschungs- und Entwicklungsprojekten führen und somit die innovative Leistungsfähigkeit des DLR im Bereich der Simulationstechnologien im Luftverkehr weiter steigern.

Über den Wissenstransfer zum Kooperationspartner Reiser Simulation and Training GmbH sowie zum Luftfahrtbundesamt konnten wichtige Beiträge zur künftigen Qualifizierbarkeit von MR-Simulatoren geleistet werden. Dies zeigt sich vor allem durch die Prä-Qualifikation MR-Simulators auf Basis eines vollausgestatteten Airbus H145D3-Cockpits durch die Firma Reiser Simulation and Training GmbH im November 2025.

8 Fortschritt bei anderen Stellen

In den Jahren 2021 und 2022 wurden erstmals zwei VR-basierte Hubschrauber-Trainingsgeräte durch die EASA zugelassen. Dabei handelte es sich um ein FNPT-II-Gerät für den Hubschraubertyp Robinson R22 Beta II sowie ein FTD-Level-3-Gerät für den Airbus Helicopters H125, jeweils unter Verwendung eines VR-Headsets.

Zur Nutzung von Head-Mounted Displays in Verbindung mit bewegungsfähigen Trainingsplattformen wurden ergänzende Anforderungen definiert, die in den „FSTD Special Conditions for the Use of HMD combined with a motion platform with reduced envelope“ [28] festgelegt sind. Auf dieser Grundlage erfolgte 2024 erstmals eine Qualifizierung von VR-Trainingssystemen durch die FAA.

Im Jahr 2025 wurde ein erweitertes XR-Trainingssystem mit hochauflösendem Headset für den FAA-Standard FTD Level 7 qualifiziert; kurz darauf folgte eine Qualifizierung für den EASA-Standard FTD Level 3. Ebenfalls 2025 erhielt ein neuer Flugsimulator (FNPT) für den Flugzeugtyp Diamond DA42 eine EASA-Qualifizierung. Dieses System ermöglicht den Piloten, sowohl das reale Cockpit als auch sich selber mittels monitorbasierter Mixed-Reality-Technik im Headset abzubilden.

9 Veröffentlichung, Vorträge

Im betrachteten Berichtszeitraum ist das Paper „Evaluation of Virtual and Mixed Reality Technologies in Helicopter Simulation“ auf dem Vertical Flight Society’s 80th Annual Forum & Technology Display in Montreal ([16]) vorgestellt und veröffentlicht worden.

Weiterhin wurde auf der European Rotors Messe vom 04.-07. November 2024 in den VFS Sessions am 06.07.2024 eine Präsentation und Vortrag über den aktuellen Stand sowie die Herausforderungen des Projektes ARiTRa gehalten. Der Titel des Vortrags lautet „Mixed Reality (MR) & Head-Mounted Display (HMD) Research at the Institute of Flight Systems“. Über den Vortrag wurde in einem LinkedIn-Beitrag und in der Mitgliederzeitschrift „VertiFlite“ der Vertical Flight Society (VFS) berichtet.

Ebenfalls gab es einen LinkedIn Beitrag zur Vergleichsstudie bei LAT:

https://www.linkedin.com/posts/dlr-institut-f%C3%BCr-flugsystemtechnik_aritra-ar-xr-activity-7300541729407991817-spsN?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=A-CoAAChs-7oBVMaLRkaspHyOBiXjcWTSD4n_Ulo

Die Veröffentlichung der Vergleichsstudie bei der LAT ist in 2026 geplant. Ebenfalls stehen noch Beiträge für Journalveröffentlichungen aus, sowie eine Dissertation, indem die Ergebnisse des Projektes mit eingehen.

10 Zusammenfassung der verwendeten Fachliteratur

- [1] European Union Aviation Safety Agency, „Certification Specifications for Helicopter Flight Simulation Training Devices (CS-FSTD(H))“. 2012.
- [2] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, und F. Kishino, „Augmented Reality: A Class of Displays On The Reality-Virtuality Continuum“, gehalten auf der Proceedings of Photonics for Industrial Applications, H. Das, Hrsg., Boston, MA, Dez. 1995, S. 282–292. doi: 10.1117/12.197321.
- [3] B. G. Witmer und M. J. Singer, „Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire“, *Presence*, Bd. 7, Nr. 3, S. 225–240, Juni 1998, doi: 10.1162/105474698565686.
- [4] J. J. LaViola, „A discussion of cybersickness in virtual environments“, *SIGCHI Bull.*, Bd. 32, Nr. 1, S. 47–56, Jan. 2000, doi: 10.1145/333329.333344.
- [5] J. Stevens, P. Kincaid, und R. Sottilare, „Visual modality research in virtual and Mixed Reality simulation“, *Journal of Defense Modeling & Simulation*, Bd. 12, Nr. 4, S. 519–537, Okt. 2015, doi: 10.1177/1548512915569742.
- [6] E. Bachelder, D. H. Klyde, N. Brickman, S. Apreleva, und B. Cogan, „Fused Reality for Enhanced Flight Test Capabilities“, in *AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference*, Boston, MA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aug. 2013. doi: 10.2514/6.2013-5162.
- [7] T. Aslandere, D. Dreyer, und F. Pankratz, „Virtual hand-button interaction in a generic virtual reality flight simulator“, in *2015 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT: IEEE, März 2015, S. 1–8. doi: 10.1109/AERO.2015.7118876.
- [8] K. W. Arthur, „Effects of Field of View on Performance with Head-Mounted Displays“, S. 149.
- [9] J. M. Ernst, S. Schmerwitz, T. Lueken, und L. Ebrecht, „Designing a virtual cockpit for helicopter offshore operations“, gehalten auf der SPIE Defense + Security, J. (Jack) N. Sanders-Reed und J. (Trey) J. Arthur, Hrsg., Anaheim, California, United States, Mai 2017, S. 101970Z. doi: 10.1117/12.2262482.
- [10] C. Walko und B. Schuchardt, „Increasing helicopter flight safety in maritime operations with a head-mounted display“, *CEAS Aeronaut J*, Okt. 2020, doi: 10.1007/s13272-020-00474-7.
- [11] A. Dikarew und T. Martini, „Dual Pilot Active Sidestick Demonstrator 2PASD Flexible rapid prototyping platform for research flight simulation“, in *50th European Rotorcraft Forum*, Marseille, France, Sep. 2024.
- [12] T. Martini, „Evaluation of Virtual and Mixed Reality Technologies in Helicopter Simulation“, *Vertical Flight Society's 80th Annual Forum & Technology Display*, Montreal, Quebec, Canada, Mai 2024.
- [13] „ADS-33E-PRF Aeronautical Design Standard, Performance Specification, Handling Qualities Requirements for Military Rotorcraft“. technical report, US Army, März 2000.
- [14] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, und M. G. Lilienthal, „Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness“, *The International Journal of Aviation Psychology*, Bd. 3, Nr. 3, S. 203–220, Juli 1993, doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3.
- [15] M. Melo, G. Gonçalves, José Vasconcelos-Raposo, und M. Bessa, „How Much Presence is Enough? Qualitative Scales for Interpreting the Igroup Presence Questionnaire Score“, *IEEE Access*, Bd. 11, S. 24675–24685, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3254892.
- [16] T. Martini, „Evaluation of Virtual and Mixed Reality Technologies in Helicopter Simulation“, in *Vertical Flight Society's 80th Annual Forum & Technology Display*, Montreal, Quebec, Canada, Mai 2024.
- [17] European Union Aviation Safety Agency, „Notice of Proposed Amendment 2020-15“. 2020.
- [18] G. Gonçalves, H. Coelho, P. Monteiro, M. Melo, und M. Bessa, „Systematic Review of Comparative Studies of the Impact of Realism in Immersive Virtual Experiences“, *ACM Comput. Surv.*, Bd. 55, Nr. 6, S. 1–36, Juli 2023, doi: 10.1145/3533377.
- [19] M. Usoh, E. Catena, S. Arman, und M. Slater, „Using Presence Questionnaires in Reality“, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Bd. 9, Nr. 5, S. 497–503, Okt. 2000, doi: 10.1162/105474600566989.

- [20]T. Schubert, F. Friedmann, und H. Regenbrecht, „The Experience of Presence: Factor Analytic Insights“, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Bd. 10, Nr. 3, S. 266–281, Juni 2001, doi: 10.1162/105474601300343603.
- [21]D. M. Johnson, „Introduction to and Review of Simulator Sickness Research“, American Psychological Association, 2005. Zugegriffen: 11. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://doi.apa.org/get-pe-doi.cfm?doi=10.1037/e456932006-001>
- [22]E. Chang, H. T. Kim, und B. Yoo, „Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements“, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Bd. 36, Nr. 17, S. 1658–1682, Okt. 2020, doi: 10.1080/10447318.2020.1778351.
- [23]J. E. Bos, S. N. MacKinnon, und A. Patterson, „Motion Sickness Symptoms in a Ship Motion Simulator: Effects of Inside, Outside, and No View“, Bd. 76, Nr. 12, 2005.
- [24]P. J. Gianaros, E. R. Muth, J. T. Mordkoff, M. E. Levine, und R. M. Stern, „A Questionnaire for the Assessment of the Multiple Dimensions of Motion Sickness“, 2010.
- [25]J. F. Knight, C. Baber, A. Schwirtz, und H. W. Bristow, „The comfort assessment of wearable computers“, in *Proceedings. Sixth International Symposium on Wearable Computers*, Seattle, WA, USA: IEEE, 2002, S. 65–72. doi: 10.1109/ISWC.2002.1167220.
- [26]S. G. Hart, „Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later“, *th ANNUAL MEETING*, S. 5.
- [27]N. Williams, „The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale“, *Occupational Medicine*, Bd. 67, Nr. 5, S. 404–405, Juli 2017, doi: 10.1093/occmed/kqx063.
- [28]„FSTD Special Conditions for the use of Head Mounted Displays (HMD) combined with a motion platform with reduced envelope“. EASA, 16. März 2023.