

**BACHELORARBEIT**

# **Entwicklung einer VR Anwendung zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz für zukünftige Kabinenkonzepte in der Luftfahrtindustrie**

---

vorgelegt am 20. Dezember 2024  
Niklas Grasshoff

Erstprüferin: Prof. Dr. Eike Langbehn  
Zweitprüfer: M.Sc. Fabian Reimer

---

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**  
Department Medientechnik  
Finkenau 35  
22081 Hamburg

# Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Virtual-Reality-Anwendung, die darauf abzielt, eine detailreiche und realistische Umgebung zur Erkundung zukünftiger Kabinenkonzepte in der Luftfahrtindustrie zu schaffen. Im Fokus stehen drei verschiedene Konzepte fensterloser Kabinen, die durch Bildschirminhalte ersetzt werden. Die Anwendung dient als Grundlage für eine explorative Studie, um die Akzeptanz solcher Konzepte bei potenziellen Passagieren zu untersuchen.

Zur Bewertung wurden sowohl quantitative als auch qualitative Methoden kombiniert, um differenzierte Einblicke in die Wahrnehmungen und Präferenzen der Teilnehmenden zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine absolute Mehrheit der Befragten prinzipiell bereit wäre, in der Zukunft fensterlos zu fliegen, sofern die Bildschirmtechnologien erweiterte Funktionalitäten und Möglichkeiten zur Individualisierung bieten. Gleichzeitig wurden jedoch Bedenken hinsichtlich des Sicherheitsgefühls und des Kontrollverlusts aufgrund der fehlenden Außenwahrnehmung geäußert.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit liefern wertvolle Hinweise für die Gestaltung innovativer Kabinenkonzepte und deren potenzielle Akzeptanz in der Luftfahrt und zeigen effektiv wie wertvoll der Einsatz von VR-Technologien sein kann zum Testen dieser.

## Abstract

This thesis focuses on the development of a virtual reality application aimed at creating a detailed and realistic environment to explore future cabin concepts in the aviation industry. The emphasis is on three different concepts of windowless cabins, where traditional windows are replaced with screen content. The application serves as the foundation for an exploratory study to assess the acceptance of such concepts among potential passengers.

Both quantitative and qualitative methods were combined to gain nuanced insights into participants' perceptions and preferences. The findings reveal that a significant majority of respondents would, in principle, be open to flying windowless in the future, provided that screen technologies offer enhanced functionalities and customization options. However, concerns were raised about the sense of security and loss of control due to the lack of external visibility.

The insights gained from this research provide valuable guidance for the design of innovative cabin concepts and their potential acceptance in aviation, effectively demonstrating the value of VR technologies in testing these concepts.

## **Gender Disclaimer**

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint.

# Contents

<b>List of Figures</b>	<b>III</b>
<b>1 Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Ziel dieser Arbeit . . . . .	1
1.3 Motivation . . . . .	2
<b>2 Theoretischer Hintergrund</b>	<b>3</b>
2.1 Wie werden aktuell Kabinenkonzepte in der Luftfahrt getestet . . . . .	3
2.2 Aktuelle Trends in der Luftfahrtindustrie . . . . .	5
2.3 Einführung: Fensterloses Fliegen . . . . .	6
2.4 Bestehende Fensterersatzsysteme in Flugzeugen . . . . .	7
2.5 Relevanz von Fenstern in Flugzeugkabinen . . . . .	8
2.6 Vorteile von Virtual Reality Simulationen . . . . .	9
2.7 Bisherige Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz von neuartigen Kabinenkonzepten	10
<b>3 Technische Umsetzung der VR Anwendung</b>	<b>12</b>
3.1 Verschiedene Designansätze . . . . .	12
3.2 Modellierungsprozess . . . . .	15
3.2.1 Modellierung der Sitze . . . . .	15
3.2.2 Texturierung des Sitzes . . . . .	16
3.2.3 Modellierung der verschiedenen Kabinenkonzepte . . . . .	18
3.3 Einführung Unity . . . . .	20
3.4 Auswahl der Render-Pipeline . . . . .	21
3.5 Import der Blender Modelle . . . . .	22
3.6 Generierung der Außenumgebung . . . . .	23
3.7 Übertragung der Außenumgebung auf Bildschirme . . . . .	23
3.8 Integration VR . . . . .	25
3.8.1 XR Plug-Ins . . . . .	25
3.8.2 Unity XR Interaction Toolkit . . . . .	25
3.9 Performance Optimierung und Überarbeitung der Anwendung . . . . .	26
3.10 Performance Optimierung . . . . .	26
3.10.1 Reduktion von Draw Calls und Batching . . . . .	26

3.10.2	Optimierte Modelle . . . . .	27
3.10.3	Außenumgebung . . . . .	27
3.10.4	Beleuchtung . . . . .	29
3.11	Audios . . . . .	31
3.12	Interaktivität . . . . .	31
<b>4</b>	<b>VR-Studie - Aufbau und Durchführung</b>	<b>32</b>
4.1	User Experience Questionnaire . . . . .	32
4.1.1	Auswertung und Interpretation . . . . .	33
4.2	Zusätzliche Fragen . . . . .	34
4.3	Durchführung der Studie . . . . .	35
<b>5</b>	<b>VR Studie - Auswertung</b>	<b>37</b>
5.1	Immersion der Testpersonen . . . . .	37
5.2	Auswertung der Kabinenkonzepte . . . . .	37
5.3	Auswertung Layout Standard . . . . .	38
5.4	Auswertung Layout Enhanced . . . . .	39
5.5	Auswertung Layout Continuous . . . . .	40
5.6	Weitere Aussagen . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>42</b>
6.1	Reflexion der VR-Anwendung . . . . .	42
6.1.1	Stärken der VR-Anwendung . . . . .	42
6.1.2	Einschränkungen der VR-Anwendung . . . . .	42
6.1.3	Beitrag und Einfluss der VR-Anwendung auf die Ergebnisse . . . . .	43
6.2	Reflexion der Studienergebnisse . . . . .	44
6.2.1	Vergleich der Kabinenkonzepte . . . . .	44
6.2.2	Allgemeine Erkenntnisse zur Akzeptanz fensterloser Kabinen . . . . .	44
6.3	Stärken und Einschränkungen der Studie . . . . .	45
6.3.1	Stärken der Studie . . . . .	45
6.3.2	Einschränkungen der Studie . . . . .	45
6.4	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>48</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>49</b>
	<b>Anhang</b>	<b>52</b>
.1	Itempaare der verwendeten UEQ Dimensionen . . . . .	52

# List of Figures

2.1	Mock-Up einer Kabine beim DLR . . . . .	4
2.2	EXACT Flottenkonzept (Aviation, 2024) . . . . .	6
2.3	Konzept einer fensterlosen Kabine (Street, 2021) . . . . .	7
2.4	Boing 777 300ER mit fensterlose Kabine . . . . .	8
2.5	Telemedizinische Kabine (“Consult Station H4D”, n.d.) . . . . .	11
3.1	Erstes Kabinenkonzept Standard . . . . .	13
3.2	Zweites Kabinenkonzept Enhanced . . . . .	14
3.3	Drittes Kabinenkonzept Continuous . . . . .	15
3.4	Beispiel verschiedener Materialien (Wu, 2023) . . . . .	16
3.5	Einfacher Nodetree in Blender . . . . .	17
3.6	Der Sitz und eine der Texture Maps . . . . .	18
3.7	Subdivision-Surface Modifier mit verschiedenen Levels (“Blender Manual”, n.d.) . . . . .	19
3.8	Modellierungsprozess . . . . .	19
3.9	Rendergrafik aus Blender der ersten Kabinenkonfiguration . . . . .	20
3.10	Anpassung von Licht und Post-Processing nach Unity Import . . . . .	22
3.11	Außenumgebung mit HDRI-Sky und Volumetric Clouds . . . . .	24
3.12	Funktionsweise der Bildübertragung . . . . .	24
3.13	Unity’s Profiler . . . . .	28
3.14	Beispiel einer extrem fehlerhaften Lightmap . . . . .	30
3.15	RGI mit 50 Area Lights (links) und ohne RGI mit 5 Area Lights (rechts) . . . . .	30
4.1	UEQ Dimensionen und die zugehörigen Items (Schrepp, 2023) . . . . .	33
4.2	Aufnahme während der Studie . . . . .	35
5.1	Dimensionsergebnisse des Standard Layouts . . . . .	38
5.2	Dimensionsergebnisse des Enhanced Layouts . . . . .	39
5.3	Dimensionsergebnisse des Continuous Layouts . . . . .	40
1	Itempaare des Standart Layouts . . . . .	53
2	Itempaare des Enhanced Layouts . . . . .	54
3	Itempaare des Continuous Layouts . . . . .	55

# 1 Einführung und Motivation

## 1.1 Ausgangssituation

Die Gestaltung von Flugzeugkabinen hat sich seit Jahrzehnten nur minimal verändert. Trotz technologischer Fortschritte ist das grundlegende Konzept von Kabinen weitgehend unverändert. Angesichts des fortschreitenden Klimawandels und den stetig steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Effizienz ist in der Luftfahrt allerdings ein Umdenken erforderlich. Innovative Kabinenkonzepte könnten somit nicht nur die Passagiererfahrung verbessern sondern könnten ebenfalls einen wertvollen Beitrag zu einer umweltfreundlicheren Luftfahrt leisten.

Die Entwicklung und das Testen solcher innovativen Kabinenkonzepte stellen allerdings eine große Herausforderung dar. Traditionelle Methoden sind in der Regel sehr zeit- und kostenintensiv, da physische Prototypen gebaut und umfangreiche Testreihen durchgeführt werden müssen. Diese Hürden verzögern nicht nur den Innovationsprozess, sondern schränken auch die Möglichkeit ein, mehrere Konzeptvarianten effizient zu bewerten.

In Anbetracht dessen gewinnt der Einsatz von virtuellen Technologien an Bedeutung. Virtuelle Realität (VR) bietet die Möglichkeit, Kabinenkonzepte in einer immersiven Umgebung zu testen, ohne aufwendige physische Modelle herstellen zu müssen. Dieser Ansatz eröffnet neue Möglichkeiten, den Entwicklungs- und Innovationsprozess von neuartigen Kabinenkonzepten zu beschleunigen und gleichzeitig die Wahrnehmung und Akzeptanz zukünftiger Kabinendesigns realitätsnah zu untersuchen.

## 1.2 Ziel dieser Arbeit

In dieser Arbeit soll eine VR-Anwendung entwickelt werden um die Nutzerakzeptanz zukünftiger Kabinenkonzepte in der Luftfahrt zu untersuchen. Exemplarisch dient hierfür das Konzept einer fensterlosen Kabine, bei dem herkömmliche Fenster durch Bildschirme ersetzt werden. Um gleichzeitig nicht nur die Akzeptanz einer fensterlosen Kabine zu erfassen, werden drei verschiedene fensterlose Konzepte entwickelt um zusätzlich Einblicke zu erhalten, inwiefern unterschiedliche Designs die Nutzerakzeptanz beeinflussen.

Die Arbeit verfolgt hierbei zwei zentrale Zielsetzungen: Erstens soll eine VR-Anwendung entwickelt werden, die eine immersive Darstellung und Interaktionen mit verschiedenen Varianten der fensterlosen Kabine ermöglicht. Zweitens wird diese Anwendung genutzt, um die Wahrnehmung der Probanden hinsichtlich der Realitätsnähe und potenzieller Akzeptanz der getesteten Konzepte zu evaluieren.

Durch die Betrachtung der fensterlosen Kabine soll gezeigt werden, inwieweit VR-Technologie dazu beitragen kann, zeit und kostenintensive Prozesse zur Bewertung von Kabinenkonzepten zu reduzieren, und gleichzeitig wertvolle Einblicke in die Nutzerakzeptanz von fensterlosen Kabinen geben kann.

### **1.3 Motivation**

Die Kabine eines Flugzeuges stellt den zentralen Dreh- und Angelpunkt der Benutzererfahrung der Passagiere dar. Sie ist nicht nur der physische Raum, in dem sie sich während des Flugzeuges aufhalten, sondern prägt auch ihre Wahrnehmung von Komfort, Sicherheit und Innovation. Eine kontinuierliche Verbesserung der Kabinengestaltung liegt daher sowohl im Interesse der Fluggesellschaften, die das Reiseerlebnis ihrer Kunden optimieren möchten, als auch der Passagiere selbst, die von einem angenehmen und funktionalem Umfeld auf oft lang stündigen Reisen profitieren möchten.

Gerade das Konzept einer fensterlosen Kabine hingegen stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar, da es für viele Passagiere schwer vorstellbar ist, auf traditionelle durchsichtige Fenster zu verzichten. Somit hängt die Akzeptanz einer innovativen fensterlosen Kabine maßgeblich davon ab, inwiefern diese auf die Erwartungen und Bedürfnisse der Passagieren zugeschnitten werden kann. An diesem Punkt bietet VR einen möglichen Ansatz.

Durch VR wird ermöglicht, dass neue Kabinenkonzepte effektiv und realitätsnah simuliert werden und Passagiere die Möglichkeit bekommen bereits in einer frühen Entwicklungsphase solche Konzepte zu erleben. VR ermöglicht es nicht nur zeit- und kosteneffizient zu testen, sondern auch gezielt Feedback zur Wahrnehmung und Akzeptanz der Passagiere zu erhalten. Somit bietet diese Technologie eine ideale Plattform, um zukünftige Kabinenkonzepte an die Anforderungen der Nutzer anzupassen und die Hemmschwelle gegenüber unkonventionellen Konzepten zu senken.

Die Kombination aus technologischem Fortschritt, steigenden Nachhaltigkeitsanforderungen und der Notwendigkeit, Passagiererwartungen zu erfüllen, macht es besonders motivierend, die Kriterien der Nutzerakzeptanz innovativer Kabinenkonzepte mithilfe von VR zu untersuchen.

## 2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden die Hintergründe zum Thema dieser Arbeit erläutert. Es wird darauf eingegangen, welche aktuellen Trends in der Luftfahrtindustrie vorhanden sind und wie Kabinenkonzepte derzeit getestet werden. Des Weiteren wird das Konzept einer fensterlosen Kabine erläutert und ein Realbeispiel vorgestellt. Zusätzlich wird auf die Vorteile von Virtual Reality eingegangen. Abschließend wird erläutert, welche Faktoren für die Akzeptanz neuartiger Kabinenkonzepte bestimmend sind.

### 2.1 Wie werden aktuell Kabinenkonzepte in der Luftfahrt getestet

In der Luftfahrt gibt es diverse Methoden, um neuartige Kabinenkonzepte zu testen. Ein sehr gängiges Vorgehen ist die Verwendung von physischen Mock-ups. Ein Mock-up ist ein Vorführmodell oder eine Attrappe, die ein Produkt oder eine Umgebung möglichst genau nachbildet. Fluggesellschaften und Hersteller wie Airbus und Boeing, aber auch das DLR (siehe Abb. 2.1), nutzen oft maßstabsgetreue Nachbildungen von Kabinen. Der Vorteil dieser Mock-ups besteht darin, dass ein realistisches Raumgefühl erzeugt wird. Außerdem können Sitzanordnungen flexibel angepasst und getestet werden. Neben der Simulation von Kabinenumgebungen können Mock-ups auch zu Trainingszwecken verwendet werden.

Eine weitere Testmöglichkeit für Kabinenkonzepte sind simulierte Testflüge. Hierbei werden echte Flugzeuge und Passagiere eingesetzt, um neue Designs während eines Fluges zu testen. Diese Testweise liefert reale Daten über das Verhalten, den Komfort und die Reaktionen der Passagiere in einer authentischen Umgebung. Auch wenn dies die bestmögliche Testmethode ist, muss beachtet werden, dass diese Art des Testens mit erheblichen finanziellen und organisatorischen Aufwänden verbunden ist und daher nur selten durchgeführt werden kann. Testflüge unterliegen zudem strengen Sicherheitsvorkehrungen und müssen zuvor von der EASA (Europäische Agentur für Flugsicherheit) zertifiziert werden. In der Regel werden Testflüge erst kurz vor der Fertigstellung eines Prototyps durchgeführt.

Zuvor können mithilfe von Computermodellen und Simulationssoftware verschiedene Aspekte der Kabine simuliert werden, um gegebenenfalls Anpassungen am Design vorzunehmen,



Figure 2.1: Mock-Up einer Kabine beim DLR

bevor es zu Testflügen kommt. Um beispielsweise den Lärmpegel zu messen, haben Hesse et al. am DLR ein Verfahren entwickelt, mit dem der Lärmpegel durch Simulation vorhergesagt werden kann (Hesse et al., 2023).

Innerhalb dieser Arbeit werden Kabinenkonzepte mithilfe von Virtual Reality (VR) getestet. Die technologische Entwicklung von Extended-Reality-Technologien, zu denen auch VR gehört, hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Mittlerweile greifen immer mehr Unternehmen auf die Nutzung von VR zurück, um Kabinendesigns zu testen. VR bietet die Möglichkeit, eine Kabine virtuell zu betreten und zu erleben, bevor ein realer Prototyp erstellt wird. Zudem lassen sich Designs und Layouts schnell anpassen, was Zeit und Kosten spart, auch wenn VR noch nicht an das realistische Gefühl eines physischen Mock-ups heranreicht (Asl & Dossick, 2023).

## 2.2 Aktuelle Trends in der Luftfahrtindustrie

Die Luftfahrtindustrie befindet sich derzeit an einem Punkt, an dem Innovation dringend benötigt wird, insbesondere durch den fortschreitenden Klimawandel und die damit einhergehenden Vorgaben für neue Flugzeugtypen. Nichtsdestotrotz befindet sich die Industrie nach wie vor im Aufschwung. Laut dem aktuellen Global Market Forecast von Airbus steigt die Verkehrsrate von Flugzeugen bis 2027 jährlich um 8,4 Prozent (Airbus, 2024). Dieses starke Wachstum lässt sich auf die Erholung von der Pandemie zurückführen. Für den Zeitraum von 2027 bis 2043 wird ein langfristiger Trend mit einem jährlichen Wachstum von 3,6 Prozent prognostiziert. Innerhalb dieser Zeit sollen allein von Airbus mehr als 42.000 neue Flugzeuge gebaut werden, von denen 45 Prozent ältere und weniger effiziente Modelle ersetzen sollen. Ähnliche Ziele wurden auch von Boeing in ihrem Commercial Market Outlook (2024) bekannt gegeben. Derzeit ist dies die effizienteste und schnellste Methode, um den Treibstoffverbrauch pro Kilometer zu verringern (Airbus, 2024). Bis 2030 sollen zudem alle Flugzeuge von Airbus mit Sustainable Aviation Fuel (SAF) betrieben werden (Airbus, 2024). Dabei handelt es sich um einen Flugkraftstoff, der – im Gegensatz zu Kerosin – ohne die Verwendung fossiler Materialien wie Erdöl hergestellt werden kann. Die Verbrennung dieses Kraftstoffs erzeugt zwar weiterhin Kohlenstoffdioxid, doch bindet der Herstellungsprozess teilweise Kohlenstoffdioxid. Somit ist die ökologische Bilanz dieses Treibstoffs dennoch nachhaltiger (“SAF - Sustainable Aviation Fuels - Klimaschutz-Portal”, 2021).

Dieser Dekarbonisierungsprozess wird in Zukunft noch vielseitigere Lösungen erfordern, darunter auch die Forschung an Wasserstoffflugzeugen, die nahezu emissionsfrei fliegen können. Hierzu wird am DLR unter dem Namen “Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies” (EXACT) geforscht. Das vorläufige Flottenkonzept (siehe Abb. 2.2) enthält Regional-, Kurz- und Mittellangstreckenflugzeuge mit verschiedenen Antriebsvarianten. Ziel von EXACT ist es, bis 2035 eine Flugzeugkonfiguration mit 70 Sitzplätzen für Passagiere und einer Reichweite von 2000 Kilometern zu entwickeln (Aviation, 2024).

Im Zusammenhang mit Wasserstoffflugzeugen wird auch immer wieder die Option einer fensterlosen Kabine diskutiert. Dieses Konzept könnte das Gewicht eines Flugzeugs signifikant verringern und somit die Reichweite erhöhen (Moruzzi & Bagassi, 2020). Gerade bei neuartigen Antriebstechnologien wie wasserstoffbetriebenen Flugzeugen ist dies relevant. Aber auch abseits von Wasserstoffflugzeugen sind Hersteller stets darum bemüht, das Gewicht von Flugzeugen zugunsten der Reichweite zu optimieren.



Figure 2.2: EXACT Flottenkonzept (Aviation, 2024)

## 2.3 Einführung: Fensterloses Fliegen

Es soll vorweggenommen werden, dass es sich hierbei nicht um ein Konzept handelt, bei dem ein Flugzeug vollständig auf Fenster verzichtet. Die Fenster werden lediglich im Passagierraum entfernt. Das Cockpit, der Bereich, in dem das Flugzeug von den Piloten gesteuert wird, soll weiterhin mit den üblichen Fenstern ausgestattet bleiben.

Im Passagierraum hingegen sollen die Fenster entfernt werden. Der Hintergrund hierfür ist folgender: Fenster beeinflussen die strukturelle Integrität der Hülle eines Flugzeugs negativ (Hadjez, 2015).

Um dies zu veranschaulichen, stelle man sich einen Aluminiumzylinder vor. Wenn man in diesen Zylinder eine große Menge ovaler Löcher bohrt, lässt sich im Nachhinein feststellen, dass die strukturelle Integrität signifikant geschwächt wurde.

Das bedeutet, dass Fenster zusätzliche Verstärkungen erfordern, um die strukturelle Integrität des Flugzeugs zu gewährleisten. Diese Verstärkungen sind insgesamt schwerer als die sonst verwendete Aluminiumlegierung. Somit erhöhen Fenster das Gewicht des Flugzeugs, was sich erheblich auf den Treibstoffverbrauch auswirkt (Moruzzi & Bagassi, 2020).

Abgesehen von der strukturellen Integrität und der Treibstoffeffizienz gibt es bereits im Herstellungsprozess einige nennenswerte Vorteile einer fensterlosen Kabine. Ohne Fenster hätten

Designer und Ingenieure eine deutlich höhere Flexibilität bei der Gestaltung der Kabine. So könnte beispielsweise der Innenraum ergonomischer gestaltet werden, da Fensterpositionen nicht berücksichtigt werden müssten.

Zu guter Letzt eröffnet eine fensterlose Kabine auch Möglichkeiten für technische Innovationen. Anstelle der Fenster könnten moderne Bildschirmtechnologien verbaut werden, die Passagieren ein individuelles und anpassbares Flugerlebnis bieten. Passagiere könnten einerseits den Blick aus einem virtuellen Fenster wählen (siehe Abb. 2.3) oder andere Inhalte wie beispielsweise Unterhaltung und Informationen anzeigen lassen.



Figure 2.3: Konzept einer fensterlosen Kabine (Street, 2021)

## 2.4 Bestehende Fensterersatzsysteme in Flugzeugen

Zurzeit gibt es noch keine vollständig fensterlosen Kabinen im zivilen Luftfahrtbereich, die im kommerziellen Einsatz sind. Einzig Emirates hat 2018 in einer Boeing 777-300ER ein bildschirmbasiertes Fensterersatzsystem in ihrer First Class verbaut (siehe Abbildung 2.4) (BBC, 2018). Hier wird in Echtzeit eine Außenansicht wiedergegeben, die von Kameras außerhalb des Flugzeugs aufgenommen wird. Somit wird den Passagieren das Gefühl vermittelt, sie hätten ein echtes Fenster.



(a) Boeing 777 300ER (Viana, 2020)



(b) Boeing 777 300ER 1st Class (BBC, 2018)

Figure 2.4: Boeing 777 300ER mit fensterlose Kabine

## 2.5 Relevanz von Fenstern in Flugzeugkabinen

Dieser Teil soll erläutern, welche funktionalen und psychologischen Rollen Fenster in Flugzeugkabinen haben. An erster Stelle steht hierbei das Wohlbefinden der Passagiere. Fenster bilden die visuelle Verbindung zur Außenwelt, was dafür sorgen kann, dass sich das Gefühl der Isolation oder der Enge verringern kann, welches auftreten kann, wenn sich viele Personen auf engem Raum ohne Ausgang befinden (Hamza et al., 2023). Dies betrifft besonders den Anteil der Passagiere, die in der Economy Class untergebracht sind. Zudem empfinden die meisten Passagiere es als angenehm, die Landschaft, Wolkenformationen oder auch den weiten Blick über den Horizont zu beobachten (Hamza et al., 2023). All diese Punkte geben den Passagieren ein Gefühl der Orientierung und somit auch ein Gefühl der Sicherheit.

Ebenso erweitern Fenster den Raum visuell, was gerade für klaustrophobisch veranlagte Passagiere von Vorteil sein kann, um einem Angstgefühl vorzubeugen. Andere Passagiere wiederum, die allgemein Angst vorm Fliegen haben, können sich durch den Blick nach außen vergewissern, dass sich das Flugzeug, und somit sie selbst, sich nicht in Gefahr befinden (Hamza et al., 2023).

Das natürliche Licht, welches durch die Fenster in den Innenraum strömt, lässt die Kabine heller und angenehmer wirken. Dies fördert nicht nur das Wohlbefinden der Passagiere, sondern hilft auch, den Jetlag zu reduzieren, indem es dem Körper hilft, den Tag-Nacht-Rhythmus anzupassen (Becker et al., 2015).

Das Tageslicht kann auch essentiell in Notfallsituationen sein. Es ermöglicht der Crew und den Passagieren einen Blick nach außen. Im Falle einer notwendigen Evakuierung kann so rechtzeitig Kenntnis von Gefahren genommen werden, wie bspw. Feuer oder Hindernissen (Yoo et al., 2013).

Zuletzt können Fenster von Fluggesellschaften auch zu Prestigezwecken für Reisende genutzt werden. So können größere Fenster besser für höherpreisige Sitzkategorien vermarktet werden.

## 2.6 Vorteile von Virtual Reality Simulationen

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Entwicklung einer VR-Anwendung, daher sollen zunächst im Folgenden einige Vorteile von VR in Industrie und Forschung hervorgehoben werden. Der wesentlichste Vorteil von VR ist es, teure physische Prototypen und Testumgebungen zu vermeiden. So kann bspw. im Rahmen dieser Arbeit eine virtuelle Umgebung realisiert werden, in der wertvolle Einblicke in die Nutzerakzeptanz von bildschirmbasierten fensterlosen Kabinen generiert werden. Die Alternative eines realen Vorführmodells wäre, mit großer Gewissheit, um ein Vielfaches kostenintensiver im Hinblick auf Material- und Entwicklungskosten (Asl & Dossick, 2023).

Abseits der Kosten können VR-Umgebungen in der Regel auch in kürzerer Zeit entwickelt werden. Zudem können Anpassungen und weitere Iterationen von VR-Konzepten in der Regel deutlich schneller durchgeführt werden. Ebenso können verschiedene Konzeptvarianten einfach in eine Testumgebung integriert werden. Somit ist der gesamte Entwicklungszyklus im Vergleich zu realen Anwendungen häufig verkürzt. Auch wenn es sich nicht um reale Umgebungen handelt, können dennoch realistische Szenarien hervorgerufen werden. Gerade im Bereich der Medizin, Luftfahrt und sonstigen industriellen Zweigen können somit Situationen getestet werden, die andernfalls möglicherweise zu gefährlich wären (Duruaku et al., 2023). Somit eignet sich VR auch ideal zu Trainingszwecken. Auch im Bereich der Zusammenarbeit birgt VR den Vorteil, dass Teams, die sich an verschiedenen geografischen Orten befinden, die Möglichkeit besitzen, in der gleichen virtuellen Umgebung zu arbeiten (Bower et al., 2016). Somit kann insbesondere internationale Arbeit gefördert werden und zusätzlich Reise- und Organisationskosten gespart werden.

In Ergänzung zum ersten Absatz soll zuletzt die Möglichkeit zum Testen von Benutzerakzeptanz und Usability-Tests weiter erörtert werden. VR ermöglicht es, diverse Benutzererfahrungen zu testen, bevor reale Produkte auf den Markt kommen (Hinricher et al., 2023). Somit können Designer frühzeitig Konzepte testen und auf Benutzerfreundlichkeit testen. Es gibt bereits Ansätze eines Mixed-Reality-Co-Design-Prozesses, der unter anderem von Sebastian Cornelje am DLR angewandt wird. Hier konnten Probanden einer Cabin Crew in einer VR-Umgebung sich ihren Arbeitsplatz nach ihrer Vorstellung anpassen. Somit wird nicht nur für Zielgruppen designt, sondern direkt mit ihnen. Dies fördert den Entwicklungsprozess, indem die verschiedenen Bedürfnisse der Zielgruppen bereits frühzeitig sichtbar gemacht werden (Cornelje, 2023).

## 2.7 Bisherige Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz von neuartigen Kabinenkonzepten

Die Akzeptanz von fensterlosen Kabinen in der Luftfahrt ist ein vielschichtiges Thema, welches den Passagierkomfort, die technologische Integration und gestalterische Überlegungen umfasst. Untersuchungen zeigen, dass die wahrgenommene Nützlichkeit einen erheblichen Einfluss auf die Akzeptanz neuer Technologien hat. Hierzu haben Baudier et al. sich mit telemedizinischen Kabinen befasst. Dies sind Kabinen, in denen Patienten unter Einsatz von audiovisuellen Kommunikationstechnologien untersucht werden, ohne dass ein physischer Kontakt zu medizinischem Personal besteht. Diese können analog betrachtet werden zu fensterlosen Kabinen in der Luftfahrt. Die Erkenntnisse von Baudier et al. heben hervor, dass die Akzeptanz einer Technologie steigt, wenn Nutzer diese als vorteilhaft empfinden. Dies deutet darauf hin, dass ähnliche Prinzipien auf fensterlose Kabinendesigns zutreffen, bei denen die wahrgenommenen Vorteile den Passagieren effektiv vermittelt werden müssen (Baudier et al., 2021).

Damit ein fensterloses Design als Vorteil wahrgenommen wird, muss der Passagierkomfort und die Orientierung im Vordergrund stehen. Crescenzo et al. empfehlen dementsprechend einen menschenzentrierten Designansatz, bei dem die Bedürfnisse und der Komfort der Passagiere im Vordergrund stehen. Sie schlagen vor, Nutzer in den Designprozess mit einzubeziehen, um die Akzeptanz zu erhöhen (De Crescenzo et al., 2019). Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von Cornelje, der ebenfalls schlussfolgerte, dass das Einbeziehen von direkten Nutzern im Designprozess zu einer erhöhten Akzeptanz führen kann (Cornelje, 2023) <sup>1</sup>.

Darüber hinaus spielen technologische Aspekte des Kabinendesigns, die über die Funktion der Fenster hinausgehen, wie Luftqualität und Umweltkontrollsysteme, eine bedeutende Rolle für die Nutzerakzeptanz. Forschungen von Yang et al. zeigen, dass die Aufrechterhaltung einer akzeptablen thermischen Umgebung für den Passagierkomfort entscheidend ist, insbesondere bei neuartigen Kabinendesigns, bei denen traditionelle Orientierungshilfen, wie Fenster, fehlen (Yang et al., 2019). Zusätzlich kann die Integration fortschrittlicher Technologien, wie Künstlicher Intelligenz für personalisierte Dienste, das emotionale Erlebnis der Passagiere verbessern und möglicherweise Bedenken hinsichtlich des Fehlens von Fenstern lindern (Rjsé et al., 2023). Dies deutet darauf hin, dass eine Kombination aus effektiver Kommunikation über die Vorteile fensterloser Designs und der Einbindung fortschrittlicher Komforttechnologien zu einer größeren Akzeptanz bei den Passagieren führen könnte.

Zusammenfassend hängt die Akzeptanz fensterloser Kabinen von einem sorgfältigen Gleichgewicht zwischen wahrgenommener Nützlichkeit, Komfort und technologischer Inte-

---

<sup>1</sup>Crescenzo et al. und Cornelje haben beide ebenfalls VR-Technologien in ihren Untersuchungen benutzt.



Figure 2.5: Telemedizinische Kabine (“Consult Station H4D”, [n.d.](#))

gration ab. Indem die Luftfahrtindustrie auf menschenzentrierte Designprinzipien setzt und potenzielle Bedenken in Bezug auf Orientierung und Komfort anspricht, kann sie eine positivere Wahrnehmung dieser innovativen Kabinendesigns fördern.

# 3 Technische Umsetzung der VR Anwendung

In diesem Kapitel soll der Entwicklungsprozess der VR-Anwendung dargestellt werden, die zum Testen der Nutzerakzeptanz verwendet wird. Zuerst werden die verschiedenen Designansätze der fensterlosen Kabine erläutert. Anschließend soll auf den Modellierungsprozess der verwendeten 3D-Modelle eingegangen werden. Die Modelle sollen im nächsten Schritt in Unity importiert werden. Innerhalb von Unity wird die VR-Funktionalität integriert, sodass sich innerhalb der Modelle bewegt werden kann. Des Weiteren werden Funktionen wie die Darstellungen der medialen Inhalte auf den Bildschirmen hinzugefügt. Ebenso wird erläutert, welche Formen der Performance-Optimierung verwendet wurden.

## 3.1 Verschiedene Designansätze

Die entwickelte VR-Umgebung testet spezifisch mehrere fensterlose Designansätze, um diese anschließend miteinander vergleichen zu können. Der erste Designansatz, im weiteren Verlauf dieser Arbeit als "Standard" bezeichnet, entspricht der bekannten Flugzeugkabine mit den typischen ovalen Fenstern (s. Abb. 3.1). Anstelle der normalen Fenster wurde der durchsichtige Bereich durch einen Bildschirm ersetzt. Dieses Konzept soll testen können, wie Passagiere darauf reagieren würden, wenn das gewohnte Fensterlayout bestehen bleibt, mit dem Unterschied, dass die Fenster durch Bildschirme ersetzt werden.



Figure 3.1: Erstes Kabinenkonzept Standard

Das zweite Konzept, im Folgenden als “Enhanced” bezeichnet, stellt eine vergrößerte Version des Standard-Layouts dar. Die Fenster haben eine waagerechte Ausrichtung anstelle des senkrechten Formates des Standard-Layouts (s. Abb. 3.2). Wesentlichster Unterschied hier ist jedoch nicht die Ausrichtung sondern die erheblich angepasste Größe des Fensters. Dieses bietet nun eine ungefähr drei mal so große Projektionsfläche. Hintergrund dieser Größenanpassung ist die Kompensation für das Fehlen des perspektivischen Ausblicks. Passagiere sollen somit einen Vorteil in der Entfernung der Fenster für sich entdecken, und somit die Akzeptanz der neuen Technologien erhöhen (s. Kapitel 2.7).



Figure 3.2: Zweites Kabinenkonzept Enhanced

Drittes und letztes Konzept, im Folgenden als “Continuous” bezeichnet, ist ein Konzept bei dem eine durchgängige Bildschirmfläche an der Seite der Kabine angebracht ist (s. Abb. 3.3). Dieser Entwurf wird häufig bei Konzeptionen verwendet die man im Internet vorfindet. Er stellt eine Art Panorama Aussicht aus dem Flugzeug dar und soll einen besonders luxuriösen Eindruck vermitteln. Auch hier soll wieder eine wahrgenommene Nützlichkeit durch den Panorama Ausblick hervorgerufen werden.



Figure 3.3: Drittes Kabinenkonzept Continuous

## 3.2 Modellierungsprozess

Für die im Rahmen dieser Arbeit entworfenen 3D-Modelle wurde die kostenlose Software Blender (Version 4.1) verwendet. Blender ist ein Open-Source-Programm, das primär für die Erstellung von 3D-Modellen, Animationen, VFX und Rendering verwendet wird. Die Anzahl der Nutzer ist besonders innerhalb der letzten Jahre erheblich gestiegen, da Blender einerseits kostenlos ist und aufgrund der immer besser werdenden Funktionalität auch andererseits ein ernst zunehmender Konkurrent zu anderen Polygon basierten 3D-Programmen wie Cinema 4D oder Maya geworden ist.

### 3.2.1 Modellierung der Sitze

Vor der Entwicklung der Kabinen selbst, sollte ein passender Sitz für die verschiedenen Umgebungen entworfen werden. Grundlage für das Design waren verschiedene moderne Sitzkonzepte, die anschließend in ein neues Konzept übertragen wurden. Die Sitze sollten modern wirken, da es sich im Rahmen dieser Arbeit um zukünftige Kabinen handelt (s. Abb. 3.6). Außerdem sollte der Detailgrad einigermaßen hoch sein, da die Sitze einen Großteil der Kabine ausmachen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Polygonzahl<sup>1</sup> bei maximal

---

<sup>1</sup>In einer 3D Software bezeichnet ein Polygon die Verbindung mehrerer Punkte (Pl.Vertices, Sgl. Vertex) die eine Fläche ergeben

20.000 Triangles<sup>2</sup> liegt. Somit soll ein Gleichgewicht zwischen Detailgrad und Performance erreicht werden.

### 3.2.2 Texturierung des Sitzes

Um ein vollwertiges 3D-Modell zu erschaffen, reicht es nicht nur, die Oberfläche durch Polygone zu definieren, sondern es müssen auch andere Eigenschaften wie bspw. Farbe (Color), Rauheit (Roughness) und metallische Eigenschaften (Metallic) der Oberfläche definiert werden, damit am Ende eine realistische Textur des 3D-Objektes entsteht. Dies kann ebenfalls in Blender realisiert werden. Der Oberbegriff hierfür ist das Shading. Beim Shading kann jedem 3D-Objekt ein neues Material zugewiesen werden. Jedes Material besitzt die oben genannten Eigenschaften und noch diverse weitere.

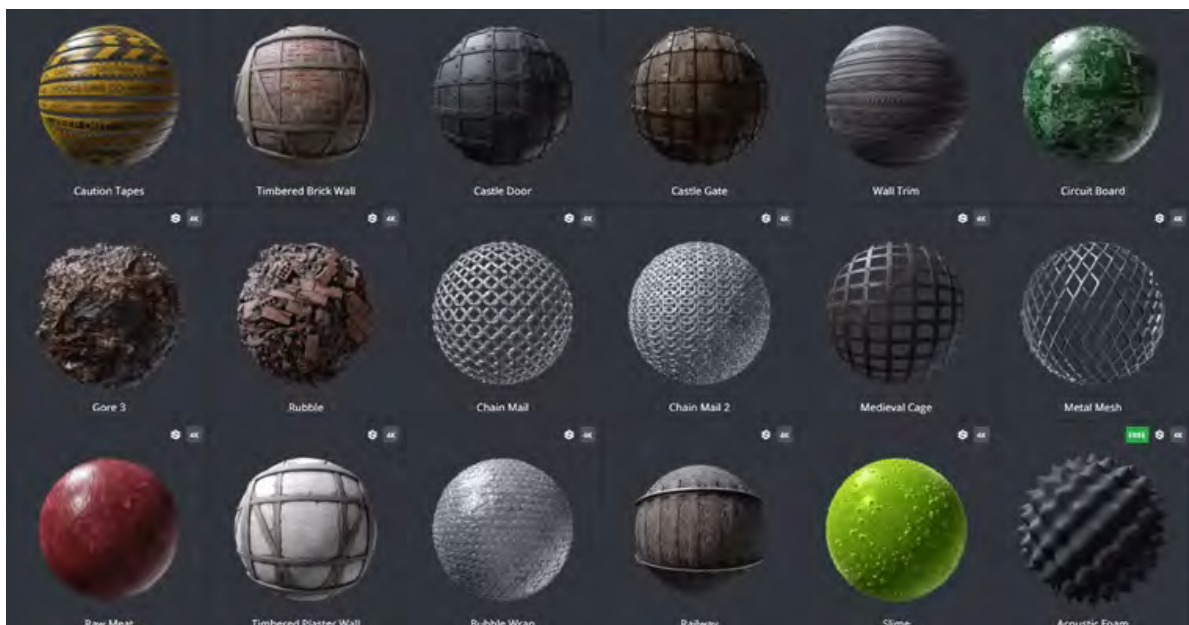


Figure 3.4: Beispiel verschiedener Materialien (Wu, 2023)

Um die Materialeigenschaften anzupassen, benutzt Blender ein eigenes nodebasiertes System, mit dem sich praktisch sämtliche vorstellbare Texturen erstellen lassen. Ein Beispiel eines verwendeten Nodetrees ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Die Funktionsweise kann sehr komplex werden und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erläutert werden.

---

<sup>2</sup>Drei Vertices ergeben ein Triangle, vier Vertices ein Quad, Polygone mit mehr als vier Vertices werden als N-Gon bezeichnet

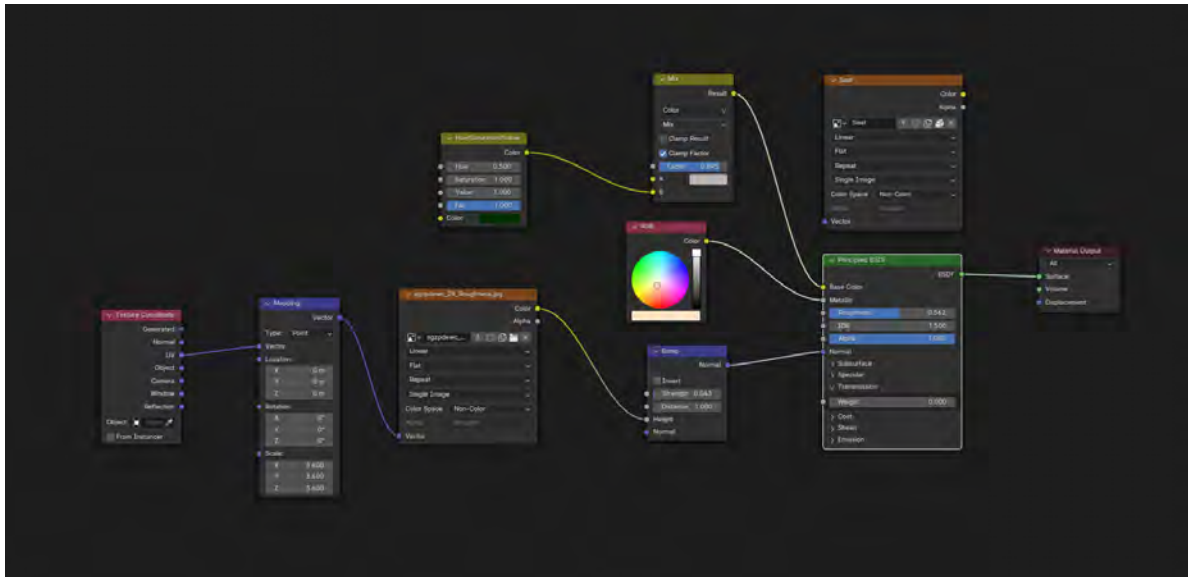


Figure 3.5: Einfacher Nodetree in Blender

In der Regel hat ein mittelmäßig komplexes 3D-Modell wie ein Sitz mehrere Materialien, da wie im echten Leben das Material der Armlehne ein anderes ist als das der Sitzfläche. Insgesamt wurden sieben verschiedene Materialien verwendet, um das Modell des Sitzes zu texturieren. Eine Vielzahl von Materialien ist jedoch unpraktisch und gleichzeitig unperformant, insbesondere bei der weiteren Verwendung in Game Engines. Daher gibt es die Möglichkeit des Baking.

Beim Baking wird jeweils eine Eigenschaft (z.B. Color) in eine Bilddatei (Texture Map) "gebaked". Anstelle eines Node Trees besitzt die Color-Eigenschaft nun eine Texture Map. Dies hat den weiteren Vorteil, dass Texture Maps softwareübergreifend funktionieren. In Blender erstellte Materialien mit den Blender-eigenen Nodes können bspw. nicht originalgetreu von Unity angezeigt werden.

Zuvor müssen die 3D-Objekte jedoch "UV-Unwrapped" werden. UV-Unwrapping ist der Vorgang, bei dem die dreidimensionale Oberfläche des 3D-Modells auf eine zweidimensionale Bildfläche projiziert wird. Diese zweidimensionale Bildfläche wird dann im Bakingprozess mit Farbwerten beschrieben. Durch das vorher durchgeführte UV-Unwrapping erscheinen die Texturen an der richtigen Stelle. In der folgenden Abbildung 3.6b können insbesondere die rechteckigen Sitzflächen oder auch die Armlehnen in der Color Map wiedererkannt werden.



(a) Beidseitige Ansicht des Sitzes



(b) Color Map des Sitzes

Figure 3.6: Der Sitz und eine der Texture Maps

### 3.2.3 Modellierung der verschiedenen Kabinenkonzepte

Bei der Modellierung der Kabinen konnte sehr effizient vorgegangen werden. Dadurch, dass eine Flugzeugkabine im Grunde ein sich wiederholendes Muster ist, reicht es, einen Teil dieses Musters zu modellieren. Anschließend kann der vorgefertigte Teil einfach beliebig dupliziert werden. Im Folgenden soll dies näher demonstriert werden.

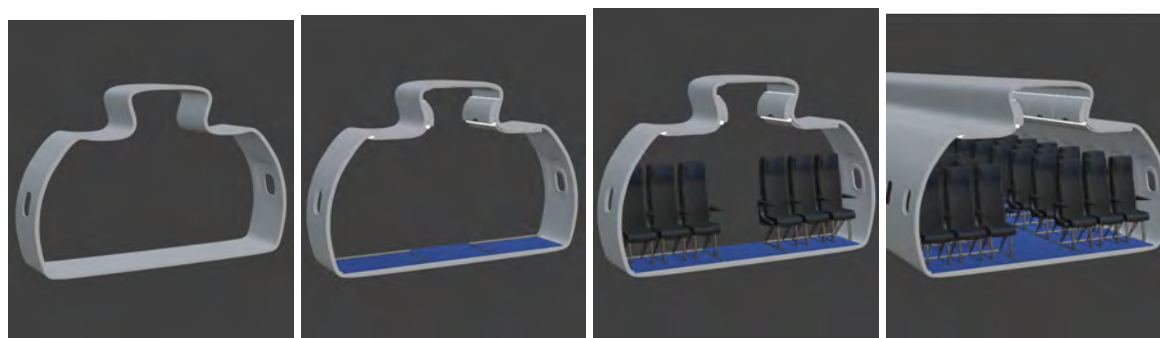
Zu Beginn wurde die Außenwand der Kabine modelliert. Um die weichen Kanten einer typischen Kabine zu entwerfen, wurde ein Subdivision-Surface Modifier benutzt. Dieser teilt alle Faces (Triangles, Quads und N-Gons werden allgemein als Faces bezeichnet) in kleinere Faces und sorgt somit für eine rundere Darstellung der Oberfläche (s. Abb. 3.7). Hierbei ist zu beachten, dass jedes Level die Anzahl der Faces mit dem Faktor vier multipliziert. Ein zu hohes Level kann die Performance enorm beeinträchtigen. In der folgenden Grafik 3.7 kann der Einfluss der verschiedenen Levels gut beobachtet werden.

Im nächsten Schritt wurden Details hinzugefügt. Darunter das OHSC (Overhead Storage Compartment), PSU (Passenger Service Unit), ein Teppich und weitere kleine Details. Anschließend wurden die Sitze eingefügt, mit jeweils drei Sitzen auf jeder Seite. Blender bietet die Funktion, dass man eine Untergruppe von Modellen (Kollektionen) instanziiert. Diese werden dann visuell dupliziert, ohne aber zusätzliche Geometrie zu generieren. Die instanziierten Kollektionen können selbst nicht bearbeitet werden. Ein weiterer großer Vorteil hingegen ist, dass Änderungen an der Ursprungs-Kollektion in Echtzeit an die instanziierten



Figure 3.7: Subdivision-Surface Modifier mit verschiedenen Levels (“Blender Manual”, n.d.)

Kollektionen weitergegeben werden. Somit müssen nachträgliche Änderungen nicht individuell angepasst werden für jede Kopie des Originals. Dieser Entstehungsprozess kann in der Abbildung 3.8 verfolgt werden. In der anschließenden Abbildung 3.9 ist zusätzlich eine Innenansicht der Kabine zu sehen.



(a) Schritt 1: Hülle      (b) Schritt 2: Details      (c) Schritt 3: Sitze      (d) Schritt 4: Array

Figure 3.8: Modellierungsprozess

Die weiteren Kabinentwürfe (Enhanced und Continuous) wurden mit dem selben Vorgehen modelliert, mit dem Unterschied, dass der Fensterbereich angepasst worden ist.

Um die Umgebungen zu vervollständigen, wurde zusätzlich ein Notausgang und ein Durchgang erstellt. Diese zusätzlichen Elemente sollen für eine größere visuelle Vielseitigkeit sorgen, um somit die Immersion der Probanden zu fördern.

Als nächstes sollen die erstellten 3D-Assets in eine Game Engine importiert werden, um anschließend VR-Funktionen zu integrieren.



Figure 3.9: Rendergrafik aus Blender der ersten Kabinenkonfiguration

### 3.3 Einführung Unity

Unity ist eine leistungsstarke Entwicklungsplattform (Game Engine) für 2D- und 3D-Spiele, die eine relativ benutzerfreundliche Oberfläche, umfassende Werkzeuge und eine große Community bietet. Eine große und aktive Community ist gerade für Anfänger äußerst relevant, da die von Nutzern zur Verfügung gestellten Lerninhalte von großem Wert für Neueinsteiger sind.

Mit Unity können Entwickler interaktive Erlebnisse für verschiedene Plattformen erstellen, darunter PC, Konsolen, mobile Geräte sowie VR-Headsets. Die Engine unterstützt C# als Programmiersprache und bietet eine Vielzahl von Assets und Plug-ins, um den Entwicklungsprozess zu beschleunigen. Die in dieser Arbeit verwendeten Plug-ins werden in den folgenden Abschnitten noch näher erläutert.

Im Unity-Editor gibt es zwei Hauptansichten. Den Scene View und den Game View.

Scene View: Die Entwickler-Ansicht. Grundsätzlich ist dies der Ort, an dem die 2D- oder 3D-Welt der eigenen Anwendung erstellt wird. Hier werden Objekte platziert, transformiert oder modifiziert. Hierzu bietet Unity eine Vielzahl an Tools, um auf sämtliche Eigenschaften der Objekte innerhalb der Szene zugreifen zu können. Zusätzlich kann die Welt aus jedem Blickwinkel betrachtet werden und interaktive Elemente in Echtzeit angepasst werden.

Game View: Die Spieler-Ansicht. Diese Ansicht zeigt, wie das Spiel aus der Ansicht des Spielers aussieht. Hier wird die Szene so angezeigt, wie sie im Spiel angezeigt wird, einschließlich aller Logik und Effekte. Diese Ansicht wird verwendet, um das Spiel oder die Anwendung zu testen und zu debuggen. Änderungen im Scene View während des aktiven Game Views werden in Echtzeit wiedergegeben, was den Entwicklungsprozess effizienter machen kann.

### 3.4 Auswahl der Render-Pipeline

Unity ist sehr vielseitig und bietet daher mehrere Render-Pipelines, mit verschiedenen Stärken und Schwächen, die es Entwicklern ermöglichen, den Rendering-Prozess an ihre spezifischen Anforderungen anzupassen. Hier sind die wichtigsten:

**Built-in Render Pipeline:** Dies ist die Standard-Rendering-Pipeline von Unity. Sie bietet grundlegende Funktionen und ist einfach zu verwenden, eignet sich jedoch weniger gut für komplexe grafische Anforderungen. Sie ist ideal für Projekte mit weniger visuellen Ansprüchen.

**Universal Render Pipeline (URP):** URP ist für eine breite Palette von Plattformen optimiert und bietet eine gute Balance zwischen Leistung und visueller Qualität. Sie unterstützt eine Vielzahl von Shadern, Post-Processing-Effekten und ist ideal für mobile Geräte sowie VR/AR-Anwendungen.

**High Definition Render Pipeline (HDRP):** HDRP ist für High-End-Grafiken ausgelegt und eignet sich hervorragend für leistungsstarke PC- und Konsolenanwendungen. Sie bietet fortschrittliche Beleuchtungs- und Schatteneffekte, darunter Area Lights und Realtime Global Illumination, realistische Materialien und umfassende Post-Processing-Möglichkeiten. HDRP erfordert jedoch mehr Hardware-Ressourcen.

Obwohl die URP sehr gut geeignet ist für VR-Anwendungen, wurde für diese Arbeit HDRP verwendet. Der Grund hierfür war die angestrebte Lichtstimmung. Für diese war die Verwendung von Area Lights unumgänglich. Die Anzahl der alternativ zu verwendenden Point Lights wäre immens gewesen und hätte zu weiteren Problemen geführt (s. Abschnitt 3.9).

Area Lights können in der URP weder im Scene- noch im Game View angezeigt werden. Um Area Lights sichtbar zu machen, müssen diese gebaked werden<sup>3</sup>. Das Baking kann mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Dies war nicht im Sinne des Entwicklungsprozesses, da häufig mit der Lichtsituation experimentiert wurde.

---

<sup>3</sup>Hier werden die verschiedenen Lichttypen in Unity näher erläutert <https://docs.unity3d.com/Manual/Lighting.html>

Ein weiterer Vorteil der HDRP gegenüber der URP ist die Möglichkeit, indirektes Licht in Echtzeit zu berechnen (Realtime Global Illumination). Ohne Realtime Global Illumination ist innerhalb der Szene sonst nur direktes Licht sichtbar. Dieser Vorgang ist zwar ressourcenintensiv, ermöglicht jedoch eine realistischere Beleuchtung in Echtzeit. Das Baken ist weiterhin möglich, nachdem die finale Lichtsituation festgelegt wurde. Das Baken von Lichtern wird im späteren Abschnitt [3.10.4 Beleuchtung](#) behandelt.

### 3.5 Import der Blender Modelle

Um Modelle plattformübergreifend verwenden zu können, wird häufig auf das FBX (Filmbox)-Dateiformat zurückgegriffen. FBX-Dateien können 3D-Modelle, Animationen, Materialien und Texturen speichern.

Die in den vorigen Abschnitten erstellten Modelle wurden ebenfalls im FBX-Format gespeichert und anschließend in Unity importiert. Falls Materialien und Texturen in der Datei vorhanden sind, können diese nun in das Ordnerverzeichnis des Unity-Projektes entpackt werden. Anschließend muss nur sichergestellt werden, dass alle Texturen den richtigen Materialien zugewiesen sind. Sollte dies der Fall sein, können die Modelle in die Szene integriert werden.

Da Unity und Blender verschiedene Render Engines benutzen, wird das anfängliche Erscheinungsbild der Modelle sich zunächst stark unterscheiden (s. Abb. [3.10](#)). Licht und Post-Processing müssen erneut in Unity hinzugefügt werden, um ein ähnliches Erscheinungsbild wie das Blender-Ergebnis (s. Grafik [3.9](#)) zu erzeugen.



(a) Nach Import



(b) Angepasste Umgebung

Figure 3.10: Anpassung von Licht und Post-Processing nach Unity Import

Hierbei sei zu beachten, dass Unity seine Umgebung in Echtzeit rendert, während Blender für ein Bild ca. eine Minute benötigt. Dieser Unterschied macht sich natürlich qualitativ bemerkbar.

## 3.6 Generierung der Außenumgebung

Um eine geeignete Außenumgebung zu generieren, wurde zunächst ein HDRI (High Dynamic Range Image)-Sky benutzt. Bei einer HDRI-Umgebung wird ein hochdynamisches Bild als Umgebungslichtquelle verwendet. Die Szene wird so mit natürlichem Licht beleuchtet. Zusätzlich handelt es sich um reale Umgebungen, weshalb die entstandenen Lichter und Schatten als authentisch angesehen werden können.

Da HDRIs Bilder sind, eignen sie sich jedoch nur als Hintergrund einer Szene. Um Tiefe und Details zu erzeugen, müssen weitere Schritte unternommen werden.

Hierfür wurden volumetrische Wolken mithilfe von Unity's Volumetric Clouds Component<sup>4</sup> generiert. Dies sind gerenderte Wolkenformationen, die umfassend angepasst werden können.

Anschließend wurde noch ein Directional Light angelegt, welches im Allgemeinen als Sonne agiert. Innerhalb der Einstellungen können auch Parameter wie Position am Horizont und die daraus resultierende Farbtemperatur angepasst werden. Diese Einstellungen haben direkten Einfluss auf die farbliche Darstellung der Wolken. In der Grafik 3.11 kann das Endergebnis betrachtet werden.

Die Kombination der Volumetric Clouds und des Directional Lights kann beliebig angepasst werden, um alle möglichen Tag- oder Nachtzeiten sowie Wetterbedingungen zu simulieren. So lassen sich Szenarien stetig anpassen, jedoch nur auf Kosten der Performance, wie in Abschnitt 3.9 erläutert wird.

## 3.7 Übertragung der Außenumgebung auf Bildschirme

Um die Außenumgebung auf die Bildschirme zu übertragen, wurde sich zunächst an dem realen Gegenstück orientiert. Eine Außenkamera nimmt die Umgebung auf, anschließend wird das Bild auf die Bildschirmflächen im Inneren übertragen, dies ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

In Unity kann dieses Konzept recht einfach realisiert werden. Es wird ebenfalls eine Kamera außerhalb des Flugzeuges platziert. Innerhalb der Kameraeinstellungen kann ausgewählt werden, dass eine Textur als Output gewählt werden soll. Dies ist keine gewöhnliche Textur, sondern eine Render Texture. Dies ist ein Unity-eigenes Format, welches bspw. erlaubt, Bilder, Videos oder Kamera-Outputs auf eine Textur zu legen, welche anschließend den Materialeigenschaften eines Objektes zugewiesen wird.

---

<sup>4</sup>Dokumentation mit weiteren Informationen: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines-high-definition@14.0/manual/Override-Volumetric-Clouds.html>

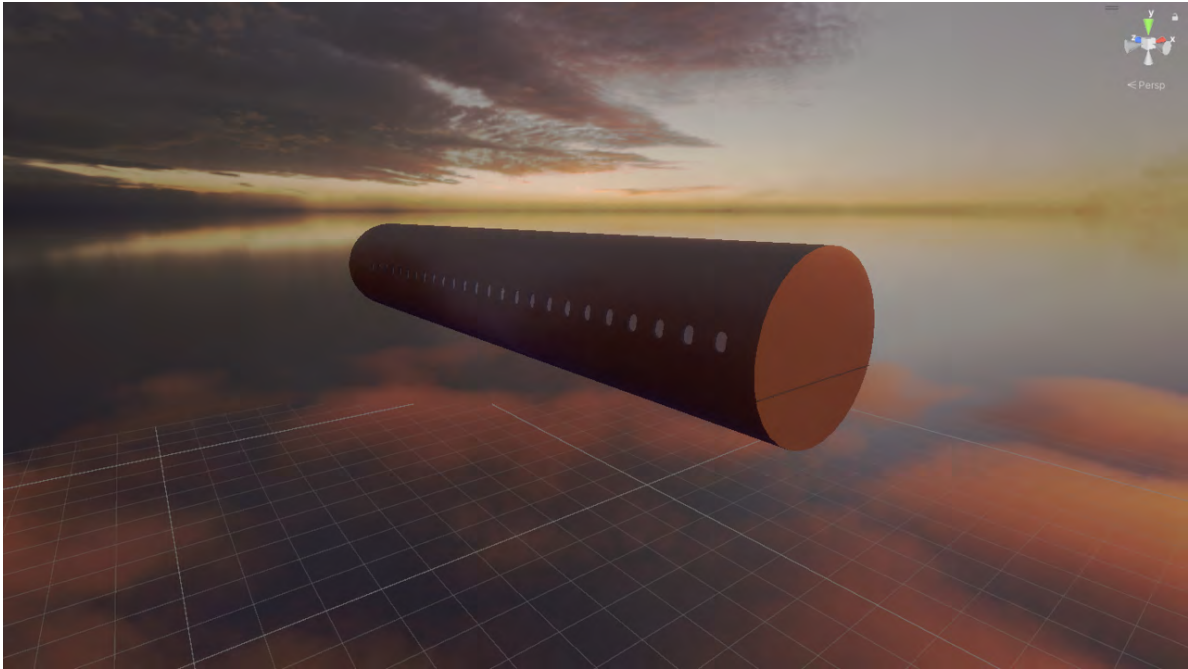
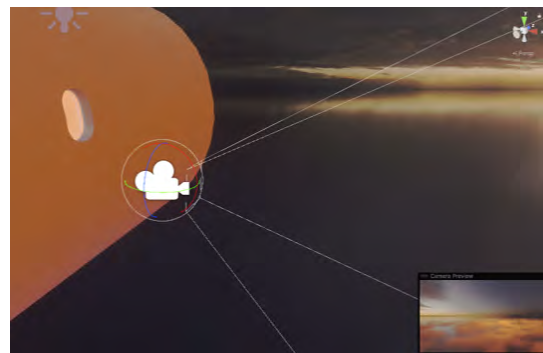


Figure 3.11: Außenumgebung mit HDRI-Sky und Volumetric Clouds

Die Render Texture wird nun als Emissive (lichtemittierende) Map gesetzt innerhalb des Materials, welches den Fenstern im Inneren der Kabine zugewiesen ist. Wenn man nun in den Game View wechselt, wird die Außenumgebung auf die Bildschirmflächen im Inneren übertragen.



(a) Innenansicht



(b) Außenansicht

Figure 3.12: Funktionsweise der Bildübertragung

## 3.8 Integration VR

Im nächsten Schritt soll die erstellte Umgebung nun in VR zugänglich gemacht werden. Um VR in ein bestehendes Projekt zu integrieren, muss zunächst das XR-Plugin-Management in Unity installiert werden. Anschließend kann zwischen verschiedenen Plug-In Providern entschieden werden. Die Bekanntesten werden im Folgenden kurz erläutert.

### 3.8.1 XR Plug-Ins

**Unity Open XR:** Ein leistungsstarkes Framework, das die Entwicklung plattformübergreifender VR- und AR-Anwendungen erleichtert. Es bietet eine einheitliche API und viele nützliche Funktionen.

**Oculus Integration:** Ein offizielles Plugin für die Entwicklung von Anwendungen für Oculus Rift und Quest. Es enthält Tools, Sample-Projekte und vorgefertigte Assets.

**SteamVR:** Ein Plugin von Valve, das die Entwicklung für HTC Vive, Oculus Rift und andere SteamVR-kompatible Headsets unterstützt. Es bietet umfassende Funktionen für die Interaktion und Steuerung.

Für diese Arbeit wurde sich für die Verwendung des Open XR Plugin entschieden, da Open XR ebenso wie SteamVR Headsets von verschiedenen Herstellern unterstützt. Die Dokumentation kann etwas unübersichtlich und überfordernd sein, allerdings gibt es viele hilfreiche Inhalte und Lernvideos innerhalb der Community, weshalb die Integration in der Regel unkompliziert ist. SteamVR ist zwar ebenfalls ein sehr nützliches und herstellerübergreifendes Tool, benötigt aber SteamVR als installierte Anwendung. Zudem muss SteamVR stets mit der eigenen Anwendung aktiv sein, was den Entwicklungsprozess durchaus stören kann.

### 3.8.2 Unity XR Interaction Toolkit

Als Ergänzung zu Open XR kann das XR Interaction Toolkit verwendet werden. Hierbei handelt es sich um ein leistungsstarkes Asset für die Entwicklung von VR-Anwendungen. Der Vorteil liegt in der Sammlung von vorgefertigten Interaktionskomponenten, die helfen, VR-Interaktionen wie Bewegung, Rotation und Teleportation schnell umzusetzen. Physische Interaktionssysteme zum Greifen oder Ziehen sind ebenfalls vorhanden, wurden jedoch für die Zwecke dieser Anwendung nicht benötigt.

Innerhalb dieser Anwendung wurden lediglich die vorgefertigten Aktionen für Bewegung und Rotation verwendet. Das Toolkit beinhaltet sogar einen Bauplan (Prefab), welcher direkt in die Szene integriert werden kann und alle oben genannten Funktionen beinhaltet.

## 3.9 Performance Optimierung und Überarbeitung der Anwendung

Die zuvor geschilderten Schritte bilden die Grundlage für die notwendigen Funktionen der Anwendung. Um die Anwendung performanter zu gestalten, waren einige Schritte erforderlich. Insbesondere die Verwendung von Real-Time Global Illumination, Volumetric Clouds und einer zusätzlichen Kamera zur Aufnahme der Außenumgebung sorgten für erhebliche Performance-Einbrüche. Zu diesem Zeitpunkt lag die Bildrate bei etwa 30 FPS (Frames per Second) in VR. Dies ist deutlich zu niedrig, um eine angenehme VR-Erfahrung zu gewährleisten. Allgemein empfohlen werden mindestens 72 FPS für VR-Anwendungen. Im Folgenden wird detailliert erläutert, welche Schritte zur Optimierung der Performance unternommen wurden und welche Inhalte entfernt oder angepasst wurden, um eine Bildrate von 72 FPS zu erreichen.

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Performance relativ zur verwendeten Hardware betrachtet werden muss. Daher wird hier die verwendete Hardware für die Entwicklung und die anschließende Nutzerstudie aufgeführt:

Alienware M16 R1 Laptop

13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900HX  
NVIDIA GeForce RTX 4080 Laptop GPU  
64GB RAM DDR5  
2TB SSD

## 3.10 Performance Optimierung

Die folgenden Techniken wurden angewendet, um die Performance der VR-Anwendung zu optimieren:

### 3.10.1 Reduktion von Draw Calls und Batching

Draw Calls sind Berechnungsaufgaben, die vom CPU (Prozessor) an die GPU (Grafikkarte) gesendet werden, um ein Bild zu generieren. Die Anzahl dieser Draw Calls hat einen erheblichen Einfluss auf die Prozessorleistung. Die Anzahl der Objekte, die der Spieler in der Szene sieht, bestimmt die Auslastung. Bei einer nicht optimierten Anwendung mit vielen

Gegenständen kann es zu einem CPU-Bottleneck kommen, bei dem der Prozessor vollständig ausgelastet ist, während die GPU noch ausreichend Kapazitäten für weitere Aufgaben hat. Dies führt zu einer geringeren Bildrate.

Um dieses Problem zu minimieren, bietet Unity die Funktion des Static Batching. Damit können Objekte, die sich nicht bewegen, in einem Draw Call zusammengefasst werden. In der hier entwickelten Anwendung bewegt sich nur der Spieler, weshalb alle anderen Objekte vom Static Batching profitieren und so die Anzahl der Draw Calls verringert wird.

### 3.10.2 Optimierte Modelle

Eine zu hohe Anzahl von Polygonen sowie hochauflösende Texturen erhöhen den Aufwand für CPU und GPU, um ein Bild zu generieren. Insbesondere der Subdivision Surface Modifier (s. Grafik Subdivision Surface Modifier 3.7) hat eine enorme Auswirkung auf die Geometriedichte eines 3D-Modells. Jedes Subdiv-Level vervierfacht die Polygonanzahl, wodurch die Geometrie deutlich detaillierter, aber auch ressourcenintensiver wird.

Zur Optimierung wurden die Subdiv-Level reduziert, und redundante Geometrie innerhalb der 3D-Modelle entfernt. Diese redundante Geometrie würde durch den Subdivision Modifier sonst ebenfalls vervierfacht werden.

Ein konkretes Beispiel: Durch Reduzierung eines Subdiv-Levels und das Entfernen redundanter Geometrie konnte die Polygonanzahl für einen Kabinenabschnitt (s. Grafik Modellierungsprozess 3.8) von etwa 50.000 Quads auf 18.000 Quads reduziert werden.

### 3.10.3 Außenumgebung

Die folgenden Abschnitte hatten die größte Auswirkung auf die Bildrate. Um diese zu analysieren, empfiehlt es sich, den Unity Profiler zu verwenden, der eine detaillierte Auskunft über sämtliche Draw Calls und deren Auswirkungen auf die Leistung in Millisekunden gibt.

In Grafik 3.13 ist die Renderzeit der zusätzlichen Außenkamera (17 ms) hervorgehoben. Um zu verstehen, welchen Einfluss diese auf die FPS hat, wird hier ein Beispiel gezeigt, wie die FPS berechnet werden:

$$\text{FPS} = \frac{1000}{\text{MS}} \quad (3.1)$$

$$\text{MS} = \frac{1000}{30\text{FPS}} \approx 33.33 \text{ ms} \quad (3.2)$$

$$\text{MS} = \frac{1000}{60\text{FPS}} \approx 16.67 \text{ ms} \quad (3.3)$$

$$\text{MS} = \frac{1000}{90\text{FPS}} \approx 11.11 \text{ ms} \quad (3.4)$$

In Abschnitt 3.9 wurde erwähnt, dass die Bildrate zu diesem Zeitpunkt bei 30 FPS (33,33 ms) lag. Das Entfernen der Außenkamera, einschließlich der gerenderten Wolken (17,27 ms, siehe Grafik 3.9), würde die FPS von ca. 30 FPS auf etwa 60 FPS erhöhen.

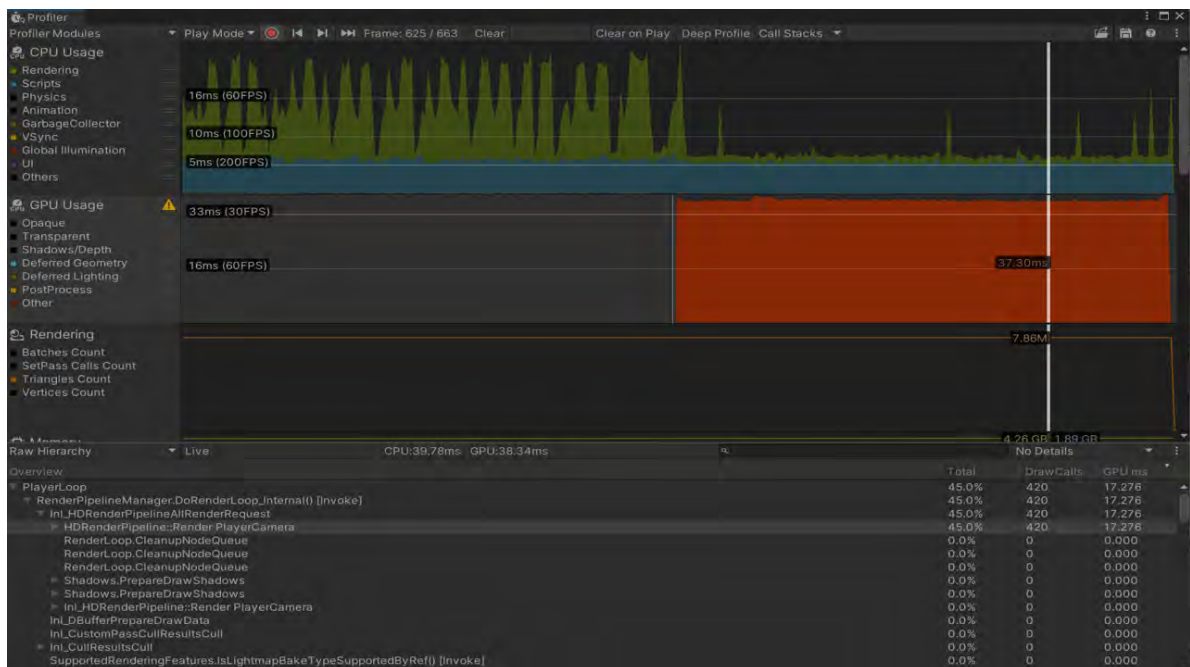


Figure 3.13: Unity's Profiler

Da die Außenkamera entfernt wurde, musste die Wiedergabe auf den Bildschirmen im Inneren der Kabine ersetzt werden. Anstelle einer gerenderten Außenumgebung wurde ein voraufgezeichnetes Video auf den Bildschirmen wiedergegeben. An dieser Stelle konnte der Unity-eigene Video Player verwendet werden. Es muss nicht jedes Fenster einzeln mit einem Videoplayer ausgestattet werden; stattdessen kann wieder auf die Render Textures zugegriffen werden. Es reicht ein einziger Video Player in der Szene, dem die ausgewählte Videodatei

zugewiesen werden kann. Anschließend wird im Video Player als Output, ähnlich wie bei den Kameras, eine Render Texture ausgewählt. Diese Render Texture wird als Emissive Map bei den Fenstern hinterlegt. Als Videodatei wurde eine Realaufnahme gewählt, die den Außenblick aus einem Flugzeug während des Fluges zeigt.

Diese Änderung hatte nicht nur den Vorteil, dass die Performance erheblich verbessert wurde. Durch die Verwendung eines realen Videos, das die Außenansicht eines Flugzeugs zeigt, wirkt die Darstellung auf den Bildschirmen deutlich realistischer als zuvor.

### **3.10.4 Beleuchtung**

Ein ähnlich großen Einfluss auf die Performance hatte die Verwendung von Realtime Global Illumination (RGI) in Kombination mit knapp 50 eingesetzten Lichtern pro Kabine. RGI bietet die Möglichkeit, dass indirektes Licht in Echtzeit berechnet wird, was jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Performance hat. Im Allgemeinen sind Lichtquellen große Faktoren und benötigen viel GPU-Leistung. Ohne die Verwendung von RGI ist man allerdings darauf angewiesen, vorhandene Lichtquellen zu baken (Lightbaking). Dieser Prozess ist ähnlich wie das Baken von Texturen (siehe Abschnitt 3.2.2). Beim Lightbaking werden Lichtinformationen von statischen (unbeweglichen) Oberflächen berechnet und in einer Lightmap gespeichert. Genau wie bei einer Texturmap handelt es sich hierbei um eine Bilddatei. Das bedeutet, dass Beleuchtung, Schatten und indirektes Licht für statische Objekte in einer Szene vorab berechnet und als Texturen gespeichert werden. Die Vorteile des Lightbakings liegen in der verbesserten Performance, da die Beleuchtung nicht in Echtzeit berechnet werden muss, wie es bei RGI der Fall ist.

Im Entwicklungsprozess dieser Anwendung war es jedoch nicht möglich, eine fehlerfreie Lightmap zu erstellen, trotz vielfältiger Versuche. Es tauchten immer wieder größere oder kleinere Artefakte auf, die das Erscheinungsbild der Kabine beeinträchtigten (siehe Abbildung 3.14). Die Ursachen hierfür können sehr vielseitig sein, und es fehlte an Zeit, um diese systematisch zu untersuchen.

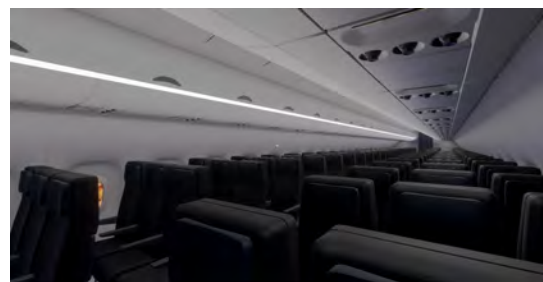


Figure 3.14: Beispiel einer extrem fehlerhaften Lightmap

Als Alternative wurde entschieden, nur die notwendigsten Lichter zu installieren. Die 50 Area Lights pro Kabine wurden auf fünf reduziert. Der qualitative Unterschied ist merkbar (siehe Abbildung 3.15), jedoch sollte dies die Immersion der Probanden nicht erheblich beeinträchtigen. Die Reduktion der Lichtquellen führte zu einer erheblichen Verbesserung der Performance, ohne die grundlegende visuelle Qualität der Szene zu gefährden.



(a) RGI Setup



(b) Alternatives Setup

Figure 3.15: RGI mit 50 Area Lights (links) und ohne RGI mit 5 Area Lights (rechts)

Durch diese Anpassung konnte die Bildrate auf bis zu 85 FPS angehoben werden. Damit

wurde das ursprüngliche Ziel von mindestens 72 FPS erreicht und die VR-Erfahrung deutlich verbessert, was zu einer flüssigeren und komfortableren Nutzung der Anwendung führte.

### **3.11 Audios**

Um die Anwendung immersiver zu gestalten wurde eine Tonaufnahme aus dem inneren einer Flugzeugkabine während des Fluges eingefügt. Diese beinhaltet weitestgehend das Rauschen der Turbinen und wird permanent abgespielt. Außerdem wird hin und wieder ein Ton abgespielt der das Anschnallen im Flugzeug signalisiert.

### **3.12 Interaktivität**

Die Interaktivität wurde durch ein Skript ermöglicht, das es den Testpersonen erlaubt, auf Knopfdruck zwischen den drei verfügbaren Inhalten zu wechseln: der Außenansicht, einem Flug durchs Universum und einem Kaminfeuer. Diese Optionen bieten den Nutzern unterschiedliche Erlebnisse und verdeutlichen die Vielseitigkeit der Bildschirme in einer fensterlosen Kabine. Das Ziel ist es, den Testpersonen eine Auswahl zu bieten, die ihr Erlebnis bereichert und gleichzeitig die Nutzerakzeptanz für fensterlose Kabinenkonzepte zu fördern.

# 4 VR-Studie - Aufbau und Durchführung

In diesem Kapitel wird der Aufbau der Studie und die verwendeten Systeme zur Erfassung der Nutzerakzeptanz detailliert erläutert. Hierfür wurde das User Experience Questionnaire (UEQ) verwendet. Mithilfe des UEQ soll die Benutzererfahrung quantitativ erhoben werden. Anschließend werden einige offene, qualitative Fragen gestellt, um weitere Eindrücke der Benutzererfahrung zu erhalten.

## 4.1 User Experience Questionnaire

Das User Experience Questionnaire (UEQ) wird verwendet, um die Benutzererfahrung eines Systems zu testen. Es eignet sich gut, um subjektive Eindrücke zu sammeln und zu analysieren, wie ein System bei den Nutzern emotional und kognitiv wahrgenommen wird (Schrepp, 2023). Der UEQ ist standardisiert und beinhaltet maximal 26 Items, die in 6 Dimensionen aufgeteilt sind:

Attraktivität: Misst die allgemeine Attraktivität und wie positiv das System erlebt wird.

Klarheit: Bewertet die Verständlichkeit und Benutzerfreundlichkeit der Anwendung.

Effizienz: Misst, wie gut und schnell das System den Nutzer beim Erreichen seiner Ziele unterstützt.

Verlässlichkeit: Misst die Robustheit und Verlässlichkeit der Anwendung.

Stimulation: Bewertet, wie anregend und motivierend das System ist.

Originalität: Misst den Innovationsgrad und wie kreativ das System empfunden wird.

Die entsprechenden Items werden in Grafik 4.1 gelistet

Die Items besitzen jeweils gegensätzliche Wertepaare (bspw. gut und schlecht). Diese können durch eine Skala von +3 (extrem positiv) bis -3 (extrem negativ) bewertet werden. Hierbei sei zu erwähnen, dass nicht alle 26 Items benutzt werden müssen. Es reicht, die zu verwenden, die im Sinne des zu testenden Systems stehen (Schrepp, 2023).

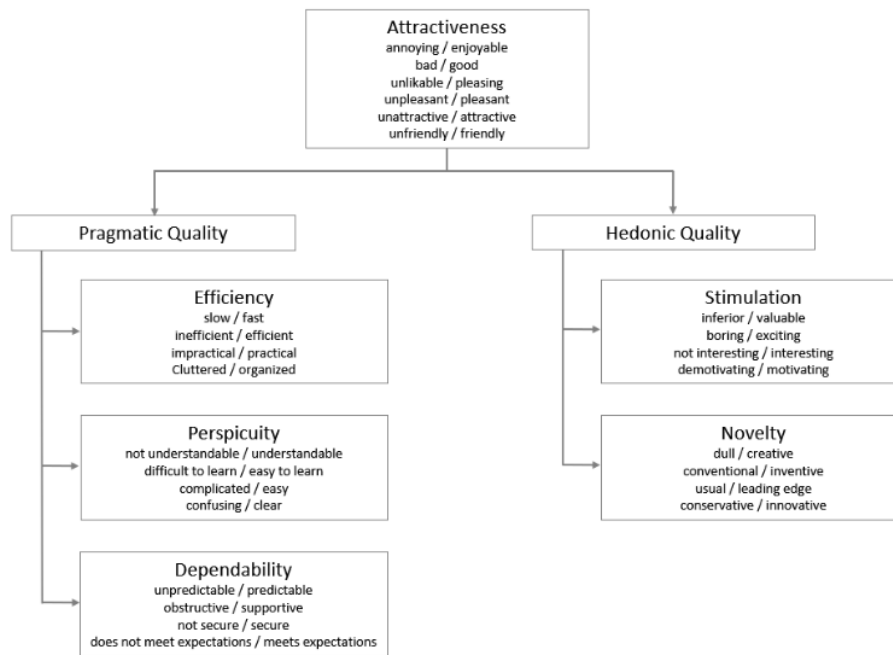


Figure 4.1: UEQ Dimensionen und die zugehörigen Items (Schrepp, 2023)

Da bereits drei Fragebögen benötigt werden, um zwischen den drei Konzepten zu differenzieren, wurden die pragmatischen Dimensionen Klarheit, Effizienz und Verlässlichkeit ausgelassen. Diese sind im Rahmen der Untersuchung der Nutzerakzeptanz von fensterlosen Kabinen vernachlässigbar, da sie sich lediglich auf die VR-Anwendung beziehen ließen. Um dennoch wichtige Einblicke in die Gedanken zur VR-Anwendung und dem Thema fensterloses Fliegen zu erhalten, werden im Anschluss an das UEQ einige qualitative Fragen gestellt (s. folgender Abschnitt 4.2).

#### 4.1.1 Auswertung und Interpretation

Der UEQ wird ausgewertet, indem die Durchschnittswerte aller 6 Dimensionen, basierend auf den Antworten der Teilnehmer, berechnet werden. Dies geschieht, indem die Bewertungen jedes Itempaars (+3 bis -3) addiert und anschließend der Durchschnitt gebildet wird.

Somit ergeben sich die Dimensionsergebnisse für Attraktivität, Klarheit, Effizienz, Verlässlichkeit, Stimulation und Originalität durch die Mittelwerte der Itempaare, die zu jeder Dimension gehören.

Die Ergebnisse werden anschließend meist als Balkendiagramme dargestellt, um schnell zu erkennen, wie die Dimensionen im Vergleich zueinander abschneiden.

Die Interpretation der jeweiligen Ergebnisse kann zusammengefasst werden, indem Werte zwischen -0,8 und 0,8 als neutral empfunden werden, Werte über 0,8 als positiv und Werte unter -0,8 als negativ bewertet werden (Schrepp, 2023).

## 4.2 Zusätzliche Fragen

Ergänzend zum UEQ sollen noch einige qualitative Fragen mit offenen Antwortmöglichkeiten gestellt werden. Diese lassen sich zwar nicht quantifizieren, können jedoch trotzdem wertvolle Einblicke in die mögliche Nutzerakzeptanz von fensterlosen Kabinen geben. Außerdem soll den Probanden die Möglichkeit gegeben werden, die VR-Erfahrung als solche zu bewerten. Dies ist wichtig, um anschließend beurteilen zu können, inwiefern VR sich eignet, Kabinenkonzepte zu testen. Sollte der Großteil die VR-Erfahrung als unangenehm und/oder unrealistisch betrachten, müsste dieser Faktor bei der Auswertung der Ergebnisse definitiv berücksichtigt werden.

1. Hast du dich in der VR-Kabine wohl und sicher gefühlt?
2. Gab es Elemente, die dich gestört oder irritiert haben?
3. Waren die dargestellten Inhalte auf den Bildschirmen ansprechend? Was würdest du dir anders wünschen?
4. Wie intuitiv fandest du die Navigation und Interaktivität in der VR-Umgebung?
5. Wie realistisch hat sich die VR Umgebung für dich angefühlt?
6. Könntest du dir vorstellen in Zukunft fensterlos zu fliegen?
7. Welche Bedenken hättest du bei einem echten Flug in einer fensterlosen Kabine?
8. Optional: Was müsste deiner Meinung nach verbessert werden, um die Akzeptanz für fensterlose Kabinen zu erhöhen?
9. Bewerte jedes Konzept mit einer Note von 1-10 und erlautere kurz deine Entscheidung.



Figure 4.2: Aufnahme während der Studie

### 4.3 Durchführung der Studie

Die Studie wurde in den Büroräumen des DLR (ZAL Finkenwerder) durchgeführt.

Nachdem alle Teilnehmer ihr Einverständnis zur Studie gegeben haben, wurden sie auf dem vorgesehenen Stuhl platziert. Anschließend wurde das verwendete VR-Headset (Meta Quest 3) auf den jeweiligen Kopfumfang angepasst. Es ist wichtig, dass das Headset möglichst genau eingestellt wird, da sonst unerwünschte Nebenwirkungen wie Schwindel auftreten können. Außerdem muss der Linsenabstand zu den Augen ebenfalls ausgerichtet werden, da das Bild sonst unscharf wird.

Die erste Kabinenkonfiguration wurde bei jedem Teilnehmer zufällig gewählt, sodass eine statistische Voreingenommenheit durch die Reihenfolge ausgeschlossen werden konnte. Die Probanden bekamen jeweils drei Minuten Zeit, um sich in jeder Kabine umzusehen. Die Bildinhalte auf den Bildschirmen konnten auf Knopfdruck von den Probanden geändert werden, der Szenenwechsel in die nächste Konfiguration wurde von außerhalb gesteuert.

Nach spätestens zehn Minuten wurden die zu testenden Personen gebeten, das Headset abzusetzen und den Fragebogen auszufüllen. Dieser bestand zunächst aus den drei Dimen-

sionen Attraktivität, Stimulation und Originalität, welche für jedes Kabinenkonzept bewertet wurden. Anschließend wurden einmalig die zusätzlichen Fragen aus Abschnitt [4.2](#) beantwortet. Ziel war es, dass der Testdurchlauf einer Person nicht länger als 15-20 Minuten dauern sollte.

Insgesamt haben 18 Personen an der Studie teilgenommen. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Studie offengelegt.

# 5 VR Studie - Auswertung

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Studie ausgewertet und zusammengefasst werden. Die Auswertung besteht einerseits aus den Ergebnissen der UEQ-Dimensionen Attraktivität, Stimulation und Originalität und andererseits aus den Aussagen der Probanden zu den Fragen aus Abschnitt 4.2.

## 5.1 Immersion der Testpersonen

Nur eine Person empfand die Erfahrung als nicht realistisch. Zehn Versuchspersonen empfanden den Versuch als sehr realistisch, während der Rest (sieben Personen) die Erfahrung als realistisch betrachtete. Ein besonderer Faktor, laut den Probanden, der sich positiv auf die Immersion auswirkte, war die Verwendung von Soundeffekten.

Bis auf die eine Person haben sich auch alle Personen wohl und sicher in der Kabine gefühlt und hatten keine Schwierigkeiten mit der Bewegung. Zusammenfassend kann hier behauptet werden, dass die Teilnehmer keine Probleme mit der VR-Umgebung hatten und diese als immersiv betrachteten.

## 5.2 Auswertung der Kabinenkonzepte

Im nächsten Schritt sollen nun die drei Kabinenkonzepte miteinander verglichen werden. Dafür werden im Folgenden die Dimensionsergebnisse des UEQ dargestellt<sup>1</sup>. Aus dem Durchschnitt der Dimensionsergebnisse kann zudem ein Gesamterlebniswert generiert werden. Darauf aufbauend werden die Bewertungen (1-10) der Nutzer und die Kommentare dieser zu den einzelnen Konzepten aufgelistet. Anschließend erfolgt die Auswertung der zusätzlichen Fragen.

---

<sup>1</sup>Die Ergebnisse der 14 verwendeten Itempaare, aus denen sich die Dimensionsergebnisse ergeben, sind im Anhang hinterlegt.

## 5.3 Auswertung Layout Standard

Zur Auswertung der Benutzererfahrung mithilfe des UEQ wurden die drei Dimensionen Attraktivität, Stimulation und Originalität des UEQ für jedes Kabinenlayout (Standard, Enhanced, Continuous) ausgewertet.

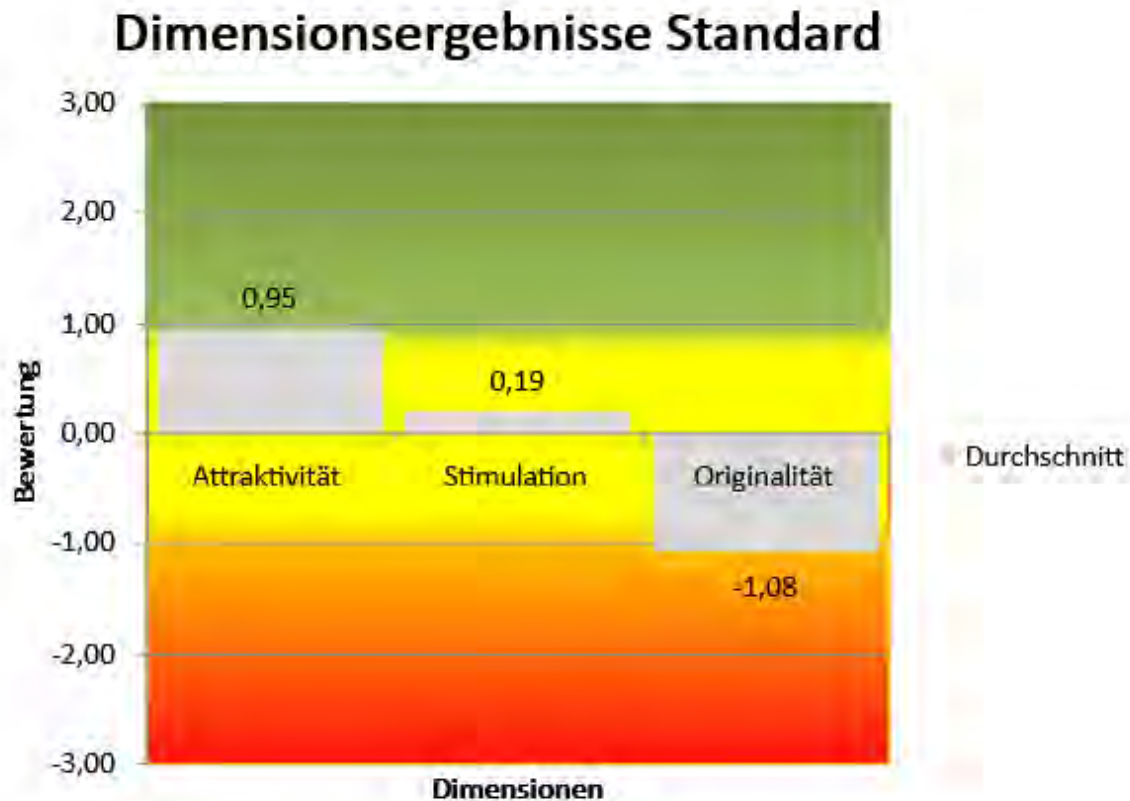


Figure 5.1: Dimensionsergebnisse des Standard Layouts

Das Standard-Layout hat im Durchschnitt eine eher neutrale Rückmeldung erzeugt, wie sich in Abbildung 5.1 erkennen lässt. Im Bereich Attraktivität wurde ein Durchschnittswert von 0,95 ermittelt, was nur knapp oberhalb einer positiven Benutzererfahrung liegt (s. Abschnitt 4.1.1). Die Dimension Stimulation erreichte nur noch einen Wert von 0,19. In der Dimension Originalität wurde sogar ein negativer Wert von -1,08 aufgenommen.

Dies ergibt einen Gesamterlebniswert von 0,02 (Skala -3 bis +3). Bei der direkten Aufforderung der Probanden, dieses Konzept auf einer Skala von 1-10 zu bewerten, wurde ein durchschnittlicher Wert von 5,63 ermittelt. Dies deutet ebenfalls auf eine neutrale Bewertung der Probanden hin.

Einige sich wiederholende positive Aussagen der Probanden waren, dass dieses Konzept durch seine gewohnte Form ein Gefühl der Sicherheit bei ihnen auslöste.

Der größere Teil der Probanden empfand diesen Aspekt hingegen als langweilig und wünschte sich mehr Innovation bei einer fensterlosen Kabine. Die geringe Fenstergröße würde weitere Funktionen schwierig gestalten und Sorge für Beklemmung, da das Sichtfeld nun statisch sei.

## 5.4 Auswertung Layout Enhanced

Bei der Auswertung des Enhanced-Layouts fällt schnell auf, dass die Versuchspersonen diesem Konzept deutlich aufgeschlossener waren (s. Abb. 5.2).

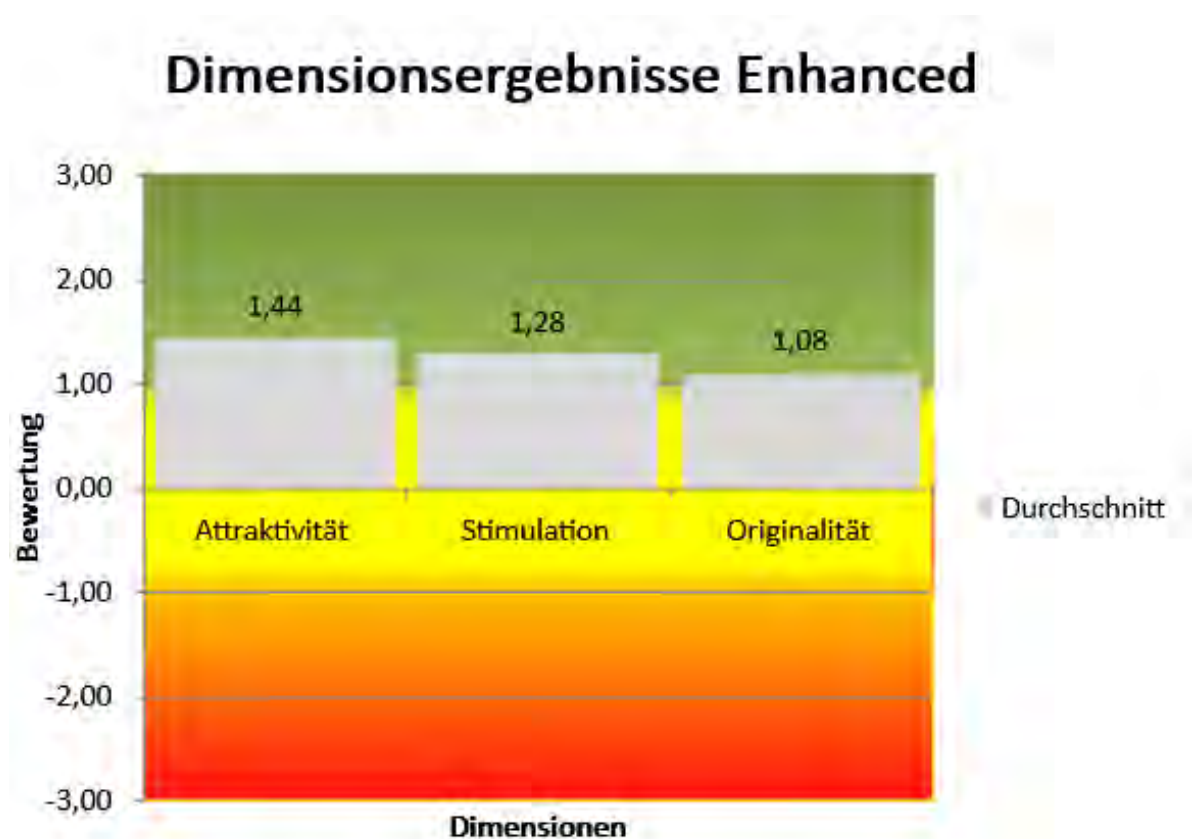


Figure 5.2: Dimensionsergebnisse des Enhanced Layouts

Sämtliche Dimensionen haben positive Werte im Bezug auf die Benutzererfahrung. Der Gesamterlebniswert liegt hier bei 1,27, was einen definitiven Unterschied zum vorigen Konzept darstellt. Bei der direkten Bewertung hat dieses Konzept im Durchschnitt 6,69 Punkte erreicht.

Etwa 75% der Probanden bewerteten dieses Konzept als eine gute Balance zwischen dem Standard- und dem Continuous-Layout. Das Breitbildformat würde außerdem viele weitere Optionen für beispielsweise Unterhaltungszwecke ermöglichen. Im Gegensatz zum vorigen Konzept würde durch die größere Bildschirmfläche das Gefühl der Enge besser kompensiert werden.

Auf der anderen Seite gab es auch einige wenige Probanden, die sich mit der horizontalen Ausrichtung schwer arrangieren konnten und die traditionelle vertikale Ausrichtung bevorzugten.

## 5.5 Auswertung Layout Continuous

Dieses Layout schnitt mit Abstand am besten unter den Probanden ab. Durchschnittswerte von über zwei in jeder Dimension (s. Abb. 5.3) können als absolut positive Benutzererfahrung betrachtet werden. Der Gesamterlebniswert lag ebenfalls bei 2,17 und ist somit extrem gut.

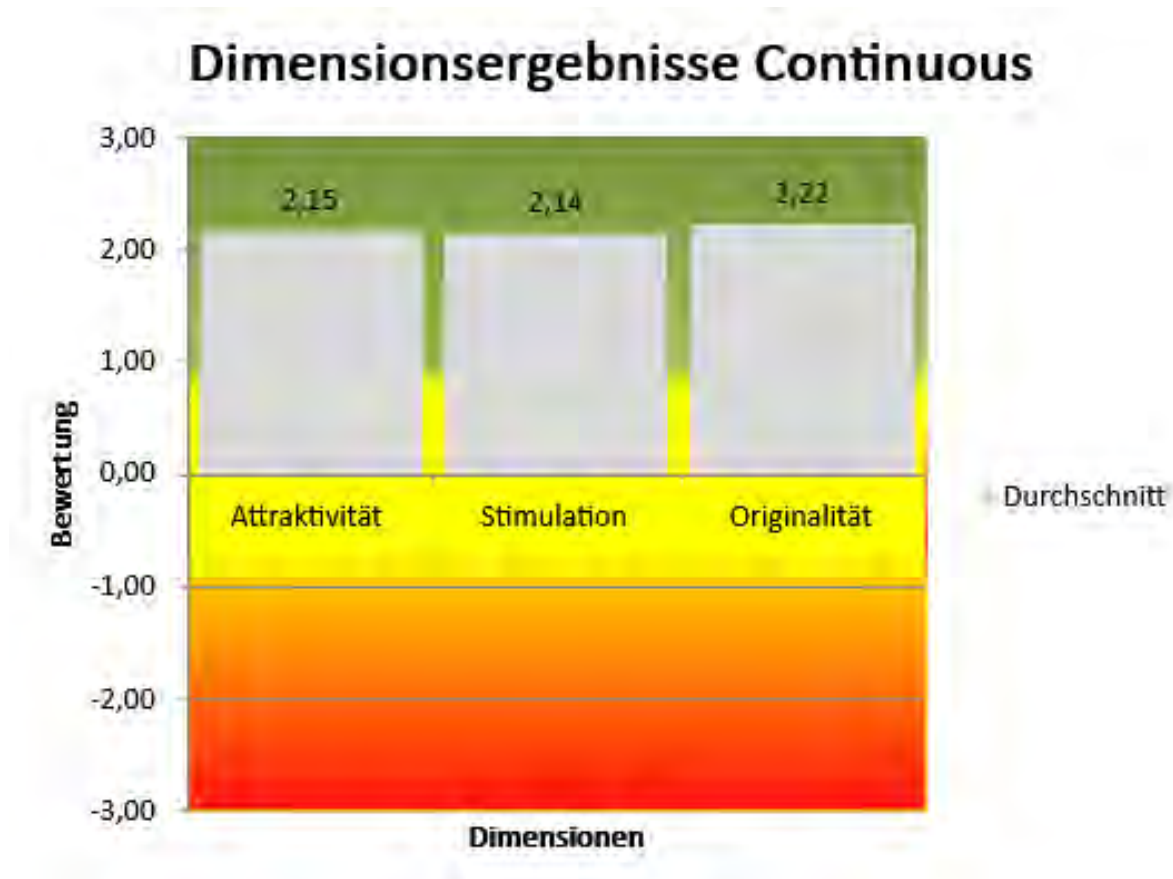


Figure 5.3: Dimensionsergebnisse des Continuous Layouts

Die direkte Bewertung lieferte einen Durchschnitt von 7,75 und ist somit auch hier die bestbewertete Konfiguration.

Nach den Aussagen der Versuchspersonen würde dieses Konzept den Passagieren eine gänzlich neue Erfahrung bieten. Die durchgängigen Bildschirme würden außerdem die wahrgenommene Größe des Raumes positiv beeinflussen. Zudem besitzt der ICE der Deutschen Bahn eine ähnliche Fensterkonfiguration, was einen Vertrautheitsfaktor für viele war.

Wichtig zu erwähnen ist noch, dass die Standardabweichung innerhalb der Dimensionen und bei der direkten Bewertung mit Abstand am größten bei diesem Konzept war. Mehreren Testpersonen war dieses Konzept zu überwältigend. Das ausgestrahlte Licht einer so großen Bildschirmfläche könnte störend wirken. Es wurde auch gefragt, inwiefern selbst noch bestimmt werden könne, welche Inhalte auf den Bildschirmen wiedergegeben werden, da schließlich alle Passagiere sich eine Ansicht teilen.

## 5.6 Weitere Aussagen

Etwa die Hälfte aller Testpersonen berichtete, dass sie den Hintergrund mit dem Kaminfeuer etwas irritierend und unpassend fanden. Feuer sei kein Anblick, den man in einer Flugzeugkabine gerne sehen würde. Auf der anderen Seite wurde die allgemeine Möglichkeit, Hintergründe zu ändern, als sehr positiv aufgenommen, und es gab viele Vorschläge für weitere Nutzungsmöglichkeiten. Einige Wünsche waren: Unterwasserwelten, Landschaften, Unterhaltung (Sport, YouTube,...), Fluginformationen und Städteansichten. Sollten diese Einsatzmöglichkeiten umgesetzt werden können, würde das nach Aussagen der Versuchspersonen die Akzeptanz von fensterlosen Kabinen erhöhen.

Negative Auswirkungen auf die Akzeptanz hätten besonders Kontrollverlustängste. In einer fensterlosen Kabine sei weniger Orientierung gegeben, und man müsse quasi auf die Richtigkeit der Außenansicht vertrauen. Dieser Faktor wurde beinahe von der Hälfte aller Probanden angegeben. Insbesondere das Standard-Layout mit seinen traditionellen Fensterkonfigurationen würde für ein beengendes Gefühl sorgen.

Ein weiterer Sorgenpunkt war der Umgang mit Notsituationen. Die Probanden gaben an, sich zu fragen, wie die ordnungsgemäße Funktion der Bildschirme zu jedem Zeitpunkt garantiert werden kann. Würden die Bildschirme ausfallen, könnten die Passagiere sich keinen Überblick mehr über mögliche Gefahrensituationen verschaffen.

Die Frage, die nun noch offen bleibt, ist, ob zukünftige Passagiere dazu bereit wären, in einer fensterlosen Kabine zu fliegen. Die Probanden in dieser Studie wären überwiegend dazu bereit. Von 18 getesteten Personen gaben lediglich drei an, dass sie sich nicht vorstellen könnten, zukünftig in einer fensterlosen Kabine zu fliegen.

# 6 Diskussion

In diesem Teil der Arbeit sollen die Ergebnisse der Studie eingehend reflektiert und erläutert werden. Zudem sollen die verschiedenen Stärken und Einschränkungen der VR-Anwendung und der anschließenden Studie diskutiert werden.

## 6.1 Reflexion der VR-Anwendung

### 6.1.1 Stärken der VR-Anwendung

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die VR-Anwendung ein effektives Werkzeug zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz darstellt. Durch die immersiven Kabinenkonzepte konnte ein realistischer Eindruck vermittelt werden, was entscheidend für die Validität der Aussagen der Probanden ist.

Die Probanden bewerteten die VR-Umgebung als sehr realistisch, was die aufwendige Ausarbeitung der drei verschiedenen Kabinenkonzepte rechtfertigt. Besonders die Entscheidung, die VR-Anwendung für den PC zu entwickeln, anstelle als Standalone für das Headset, erwies sich als sinnvoll. Dies ermöglichte den Erhalt wichtiger immersiver Faktoren, wie den hohen Detailgrad der Kabine. Auch die Integration von Sound wurde von vielen Probanden als positive Neuheit wahrgenommen und sollte in zukünftigen Studien berücksichtigt werden.

Die drei Kabinenkonzepte unterschieden sich deutlich in ihrer Bewertung, was wertvolle Einblicke in die mögliche Akzeptanz fensterloser Kabinen bietet.

Insgesamt überzeugte die VR-Anwendung durch ihre realistische und immersive Gestaltung, die als zentraler Erfolgsfaktor der Studie betrachtet werden kann.

### 6.1.2 Einschränkungen der VR-Anwendung

Die mögliche Interaktion innerhalb der Kabine war relativ begrenzt. Es war zwar möglich, sich innerhalb der Kabine zu bewegen und Bildschirminhalte anzupassen, aber abseits der drei verschiedenen Hintergründe gab es keine weiteren Interaktionsmöglichkeiten. Hätten die

Probanden hier eine größere Auswahlmöglichkeit gehabt, hätte ein noch besserer Eindruck von fensterlosen Kabinen erzeugt werden können. Der Kaminfeuer-Hintergrund wurde zudem von vielen Testpersonen als irritierend empfunden. Dass eine Feuerabbildung in einer fensterlosen Umgebung fehl am Platz ist, hätte durchaus im Voraus berücksichtigt werden können, sodass alternativ ein passenderer Hintergrund eingebaut worden wäre.

In zukünftigen Tests sollte demnach die Gestaltung der Bildschirminhalte besser auf Akzeptanzfaktoren abgestimmt werden. Außerdem könnte eine stärkere Individualisierung der virtuellen Kabineninhalte den Eindruck verstärken und das Nutzererlebnis weiter verbessern.

### **6.1.3 Beitrag und Einfluss der VR-Anwendung auf die Ergebnisse**

Die VR-Anwendung ermöglichte den Vergleich von drei verschiedenen Kabinenkonzepten mit klaren Designunterschieden, die von den Probanden nicht nur wahrgenommen, sondern aktiv in ihre Bewertungen einbezogen wurden. Ein zentraler Vorteil war die Möglichkeit, fensterlose Kabinen in einer kontrollierten Umgebung zu testen, ohne physische Prototypen bauen zu müssen. Dies spart Ressourcen und erlaubt es, flexibel verschiedene Designideen zu präsentieren und bewerten zu lassen. Die Ergebnisse unterstreichen, dass VR ein leistungsstarkes Werkzeug ist, um innovative Konzepte vor ihrer Umsetzung in der realen Welt zu testen.

Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass die VR-Umgebung selbst Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte. Obwohl sie als realistisch wahrgenommen wurde, bleibt sie in einigen Aspekten limitiert. Beispielsweise könnten echte Flugbedingungen, wie Unwetter oder Turbulenzen, in der Realität ganz andere Reaktionen hervorrufen, insbesondere bei fensterlosen Kabinen. Diese Einschränkungen sollten bei der Übertragung der Ergebnisse auf die reale Nutzung bedacht werden.

Die immersive Qualität der VR-Umgebung ermöglichte es jedoch, differenzierte Meinungen zu erfassen, die in weniger immersiven Testumgebungen möglicherweise nicht aufgetreten wären. Während sich das Konzept des "Continuous Layout" als klarer Favorit herausstellte, empfanden einige Probanden es als zu überwältigend, was verdeutlicht, dass auch Nachteile durch VR sichtbar gemacht werden können.

Abschließend ist zu beachten, dass eine Testperson Schwierigkeiten hatte, sich in der VR-Anwendung zurechtzufinden. Dies dürfte ihre Bewertung beeinflusst haben und unterstreicht die Notwendigkeit, die Benutzerfreundlichkeit künftiger Anwendungen weiter zu optimieren.

## **6.2 Reflexion der Studienergebnisse**

### **6.2.1 Vergleich der Kabinenkonzepte**

Das Standard Layout konnte insgesamt nur eine mittelmäßige Bewertung erzielen, was auf eine nicht allzu große Akzeptanz von diesem Kabinenkonzept hinweist. Der Verlust des perspektivischen Ausblicks aus dem Flugzeug ist für viele Personen mit einem Kontrollverlust verbunden, weshalb sie dieser Technologie gegenüber eher skeptisch sind. Auch wenn das bekannte Fensterlayout für einige einen Vertrautheitsfaktor darstellte, empfand die Mehrheit dieses Konzept als Mangel an Innovation.

Das Enhanced Layout hat in den Augen der Testpersonen eine gute Balance zwischen Vertrautheit und Innovation hervorgerufen. Zwar gab es vereinzelte Kritik an der horizontalen Ausrichtung der Bildschirme, doch insgesamt wurde die größere Bildschirmfläche als positiver Faktor wahrgenommen, der viel Raum für Individualisierung bietet, was wiederum die Akzeptanz erhöhen würde. Aufgrund der allgemein hohen Zustimmung und der vermutlich einfacheren Realisierbarkeit dieses Konzeptes gegenüber dem Continuous Layout, ist dieses Konzept das, welches sich am ehesten in der Zukunft etablieren könnte.

Das Continuous Layout wurde von den Probanden überwiegend als innovativ und beeindruckend wahrgenommen, was sich in den hohen Werten der UEQ-Dimensionen sowie den direkten Bewertungen widerspiegelt. Besonders die durchgängigen Bildschirme wurden als Faktor genannt, der die wahrgenommene Raumgröße positiv beeinflusst. Dennoch zeigt die hohe Standardabweichung, dass nicht alle Probanden dieses Konzept als ideal empfanden. Die Bedenken hinsichtlich der Lichtintensität und der geteilten Inhalte machen deutlich, dass eine weitere Optimierung notwendig ist, um die Akzeptanz auch bei kritischeren Zielgruppen zu erhöhen.

### **6.2.2 Allgemeine Erkenntnisse zur Akzeptanz fensterloser Kabinen**

Einer der entschiedensten Faktoren zur Akzeptanz fensterloser Kabinen ist die Individualisierung von Bildschirminhalten. Je vielseitiger sich die Individualisierung gestaltet, desto besser. Dabei geht es nicht nur um die Anpassung der Hintergründe, sondern auch um die Bereitstellung von informativen Nutzflächen. Sollte es möglich sein, Fluginformationen oder Unterhaltungsmedien darzustellen, würde sich dies positiv auf die Nutzerakzeptanz auswirken. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der sich als Hürde zur Akzeptanz herausgestellt hat, sind Kontrollverlust und Sicherheitsbedenken bei vielen Probanden. Diese Aspekte sollten adressiert werden, um Passagieren auch in fensterlosen Kabinen ein Gefühl von Sicherheit und Orientierung zu bieten. Nichtsdestotrotz zeigt die Studie, dass die Probanden

insgesamt eine hohe Bereitschaft haben, fensterlos zu fliegen, was eine positive Perspektive für die Akzeptanz dieser Konzepte bietet.

## **6.3 Stärken und Einschränkungen der Studie**

### **6.3.1 Stärken der Studie**

Ein herausragendes Merkmal der Studie ist die innovative Methodik, die die Integration von VR-Technologien nutzt. Dadurch konnte eine realistische Testumgebung geschaffen werden, ohne dass auf teure physische Prototypen zurückgegriffen werden musste. Dies bot nicht nur die Möglichkeit, die Kabinenkonzepte in einer immersiven Umgebung zu testen, sondern auch, verschiedene Designideen effizient zu vergleichen und zu bewerten.

Die klare Differenzierung der drei Kabinenkonzepte erleichterte den Probanden die Identifikation von Stärken und Schwächen jedes Designs. Durch die Kombination von quantifizierbaren Ergebnissen aus den UEQ-Dimensionen (Attraktivität, Stimulation und Originalität) und den qualitativen Rückmeldungen aus den offenen Fragen konnte ein fundiertes Bild der Nutzererfahrung erlangt werden. Die offenen Fragen ermöglichten darüber hinaus wertvolle Einblicke in die subjektiven Eindrücke der Probanden und halfen dabei, spezifische Verbesserungsvorschläge und Kritikpunkte zu identifizieren.

### **6.3.2 Einschränkungen der Studie**

Die Stichprobengröße von 18 Probanden ist relativ klein, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Insbesondere da die getesteten Personen ausschließlich Mitarbeiter des DLR waren, könnte eine höhere Akzeptanz gegenüber innovativen Kabinenkonzepten bestehen, die nicht auf die allgemeine Bevölkerung übertragbar ist. Um diese Einschränkung zu überwinden, könnte eine größere und diversere Stichprobe in zukünftigen Studien berücksichtigt werden.

Trotz der hohen Immersion der VR-Anwendung konnte diese nicht alle Aspekte einer realen Flugzeugkabine simulieren. Aspekte wie tatsächliche Flugbewegungen, Lichteinflüsse oder die physische Präsenz anderer Passagiere wurden nicht integriert. Diese fehlenden Faktoren könnten die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz verzerren, insbesondere in Bezug auf die langfristige Nutzung und das Gefühl der Realität.

Zudem war die Interaktivität innerhalb der VR-Umgebung begrenzt. Wichtige Anpassungsmöglichkeiten wie die individuelle Anpassung von Bildschirmhalten oder die Simulation von Flugbedingungen (z. B. Start oder Landung) wurden nicht berücksichtigt. Dies

könnte dazu geführt haben, dass einige Aspekte der Nutzerakzeptanz nicht vollständig erfasst wurden.

Ein weiterer Punkt ist die zeitliche Begrenzung des Tests: Die Probanden hatten lediglich drei bis fünf Minuten Zeit, jedes Konzept zu testen, was nicht dem realen Flugerlebnis entspricht, das mehrere Stunden dauern kann. Wie sich die Kabinenkonzepte über einen längeren Zeitraum auf die Nutzererfahrung auswirken würden, wurde nicht untersucht.

Zukünftige Forschungen könnten diese Schwächen adressieren, indem sie eine größere, diversere Stichprobe einbeziehen und weitere realistische Faktoren in die VR-Umgebung integrieren, wie etwa dynamische Flugsimulationen oder die Möglichkeit, Interaktionen mit anderen Passagieren zu simulieren.

## **6.4 Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die VR-Anwendung einen entscheidenden Beitrag zum Erfolg der Studie geleistet hat, sowohl durch die realistische Darstellung der Kabinenkonzepte als auch durch ihre Flexibilität und Effizienz. Sie ermöglichte es, fensterlose Kabinenkonzepte in einer kontrollierten, immersiven Umgebung zu testen, was eine präzise Beurteilung der Akzeptanz durch die Probanden ermöglichte. Es ist jedoch wichtig, die Grenzen der Technologie bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auch wenn die VR-Umgebung als realistisch wahrgenommen wurde, können bestimmte Aspekte eines realen Flugerlebnisses, wie physische Bewegungen, Lichteffekte oder Interaktionen mit anderen Passagieren, nicht vollständig simuliert werden. Dies könnte die Ergebnisse in bestimmten Bereichen beeinflussen.

Die Kombination aus immersiver Darstellung und kontrollierter Testumgebung bietet jedoch ein großes Potenzial für die zukünftige Erforschung innovativer Designs in der Luftfahrt und darüber hinaus. Insbesondere ermöglicht die VR-Technologie die flexible und kostengünstige Untersuchung von Designideen, ohne dass physische Prototypen erforderlich sind.

Für zukünftige Studien sollte die VR-Anwendung weiterentwickelt werden, um noch realistischere Bedingungen zu schaffen. Beispielsweise könnte die Interaktivität innerhalb der Kabine erweitert werden, sodass Probanden mehr Möglichkeiten zur Anpassung der Bildschirminhalte haben. Die Integration einer breiteren Auswahl an Informationen und Unterhaltungsmöglichkeiten auf den Bildschirmen könnte ebenfalls die Akzeptanzmessung verbessern und neue Einblicke in die individuellen Präferenzen der Nutzer ermöglichen. Darüber hinaus sollte in fortgeschrittenen Studien auch untersucht werden, wie sich ein längerer Aufenthalt in einer fensterlosen Kabine auf die Passagiere auswirkt.

Die Ergebnisse der Studie sind unmittelbar auf die Luftfahrtindustrie übertragbar, da sie konkrete Hinweise darauf liefern, welche Aspekte die Akzeptanz von fensterlosen Kabinen positiv oder negativ beeinflussen. Diese Erkenntnisse sind von großem Wert für die Entwicklung zukünftiger Kabinendesigns und die mögliche Implementierung fensterloser Kabinen in der realen Luftfahrt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Studie viele Stärken aufweist, insbesondere durch die innovative Nutzung von VR und die differenzierte Analyse der Kabinenkonzepte. Gleichzeitig gibt es Schwächen, die insbesondere die Generalisierbarkeit und die Realitätsnähe der Ergebnisse betreffen. Künftige Forschungen sollten diese Herausforderungen angehen, um die Erkenntnisse weiter zu vertiefen und zu verallgemeinern.

## 7 Fazit

Die Entwicklung einer VR Anwendung zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz für zukünftige Kabinenkonzepte in der Luftfahrtindustrie hat gezeigt, dass Virtual Reality ein vielversprechendes Werkzeug zur Evaluierung innovativer Designansätze in der Luftfahrt sein kann. Die Studie hat deutlich gemacht, dass die Akzeptanz von fensterlosen Kabinen stark vom Design und der Funktionalität der eingesetzten Bildschirmtechnologien abhängt. Besonders das „Continuous“-Layout erzielte aufgrund seiner immersiven Eigenschaften und der positiven Beeinflussung des Raumgefühls die besten Ergebnisse, während das „Standard“-Layout als weniger innovativ wahrgenommen wurde. Das „Enhanced“-Layout stellt ein vielversprechendes Mittelfeld dar und konnte ebenfalls eine hohe Akzeptanz generieren.

Ein zentraler Vorteil der VR-Anwendung war die Möglichkeit, realistische Umgebungen zu schaffen, in denen Passagiere unterschiedliche Konzepte erleben und bewerten konnten, ohne dass physische Prototypen notwendig waren. Die Verwendung von Soundeffekten und interaktiven Elementen hat die Immersion weiter gefördert und die Realitätswahrnehmung der Probanden positiv beeinflusst. Dennoch zeigten die Ergebnisse auch Schwachstellen auf, wie die Sorgen um Orientierung und Sicherheit in einer fensterlosen Kabine, die durch eine verbesserte Kommunikation und technische Zuverlässigkeit der Systeme adressiert werden sollten.

Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf konzentrieren, weitere Nutzungsoptionen der Bildschirme zu integrieren und die VR-Umgebung noch detaillierter zu gestalten. Darüber hinaus könnte eine größere Stichprobe von Probanden in unterschiedlichen demografischen Gruppen untersucht werden, um breitere Erkenntnisse zu gewinnen. Insgesamt verdeutlicht diese Arbeit, dass VR ein wertvolles Werkzeug für die Designforschung in der Luftfahrt ist und das Potenzial hat, traditionelle Testmethoden sinnvoll zu ergänzen.

# Bibliography

- Airbus. (2024, May). *2024 Global Market forecast*. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/global-market-forecast>
- Asl, B., & Dossick, C. (2023). Immersive Virtual Reality Mockup Versus Physical Mockup. *Engineering Project Organization Journal*. <https://doi.org/10.25219/epoj.2022.00108>
- Aviation, “ (2024). *DLR EXACT: Flugzeugformen der Zukunft*. Retrieved October 15, 2024, from <https://www.hamburg-aviation.de/hamburg-aviation-green-projekt/dlrexact.html>
- Baudier, P., Ammi, C., & Kondrateva, G. (2021). The acceptability of telemedicine cabins by the students. Retrieved October 15, 2024, from [https://shs.cairn.info/article/E\\_JIE\\_PR1\\_0075?tab=texte-integral](https://shs.cairn.info/article/E_JIE_PR1_0075?tab=texte-integral)
- BBC. (2018). Emirates looks to windowless planes. Retrieved October 21, 2024, from <https://www.bbc.com/news/business-44383220>
- Becker, T., Penzel, T., & Fietze, I. (2015). First jet lag symptoms after travelling across multiple time zones. *Biological Rhythm Research*, 46(3), 361–370. <https://doi.org/10.1080/09291016.2015.1015230>
- Aviation, “ (n.d.). Blender Manual. Retrieved December 12, 2024, from [https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/subdivision\\_surface.html](https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/subdivision_surface.html)
- Bower, M., Lee, M. J. W., & Dalgarno, B. (2016). Collaborative learning across physical and virtual worlds: Factors supporting and constraining learners in a blended reality environment. *British Journal of Educational Technology*, 48(2), 407–430. <https://doi.org/10.1111/bjet.12435>
- Aviation, “ (n.d.). Consult Station H4D. Retrieved December 12, 2024, from <https://www.medicaexpo.de/prod/h4d/product-84345-537117.html>
- Cornelje, S. (2023). *Mixing realities: Combining extended and physical reality in co-creative design for the galley of the flying-v* [Master’s thesis, TU Delft]. Retrieved December 12, 2024, from <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:ba974258-822f-4778-b2bd-cf6aac40ddb9>
- De Crescenzo, F., Bagassi, S., Asfaux, S., & Lawson, N. (2019). Human centred design and evaluation of cabin interiors for business jet aircraft in virtual reality. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(2), 761–772. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00565-8>
- Duruaku, F., Nguyen, B., Green, N., Sonnenfeld, N. A., & Jentsch, F. (2023). Suitability of Virtual Reality for Supplemental Scenario-based Training to Facilitate Crew Resource

- Management Outcomes. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 67(1), 2394–2396. <https://doi.org/10.1177/21695067231192656>
- Hadjez, F. (2015). Stress analysis of an aircraft fuselage with and without portholes using cad/cae process. *Journal of Aeronautics and Aerospace Engineering*, 04. <https://doi.org/10.4172/2168-9792.1000138>
- Hamza, Y., Fouad, H., & Soliman, D. (2023). Evaluating Passengers' Satisfaction with Aircraft Cabin Interior in EgyptAir. *International Journal of Tourism and Hospitality Studies /International Journal of Tourism and Hospitality Studies*, 4(2), 72–88. <https://doi.org/10.21608/ijthsx.2023.203695.1055>
- Hesse, C., Walther, J.-N., Allebrodt, P., Wandel, M., Algermissen, S., Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, D. e., GmbH, A. O., für Systemleichtbau, I., & für Aeroelastik, I. (2023). *Wissensbasierte Modellgenerierung für die Vorhersage von Kabinenlärm im Kontext des Flugzeugvorentwurfs* (tech. rep.). Retrieved December 12, 2024, from [https://elib.dlr.de/194485/1/HesseEtal\\_166\\_DAGA2023.pdf](https://elib.dlr.de/194485/1/HesseEtal_166_DAGA2023.pdf)
- Hinricher, N., König, S., Schröer, C., & Backhaus, C. (2023). Effects of virtual reality and test environment on user experience, usability, and mental workload in the evaluation of a blood pressure monitor. *Frontiers in Virtual Reality*, 4. <https://doi.org/10.3389/frvir.2023.1151190>
- Moruzzi, M. C., & Bagassi, S. (2020). Preliminary design of a short-medium range windowless aircraft. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(3), 823–832. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00676-7>
- Rjsé, V., Jylkäs, T., & Miettinen, S. (2023). AI Enabled Airline Cabin Services: AI Augmented Services for Emotional Values. Service Design for High-Touch Solutions and Service Quality. *Design Management Journal*, 18(1), 100–115. <https://doi.org/10.1111/dmj.12090>
- Aviation, “ (2021, June 16). *Saf - sustainable aviation fuels - klimaschutz-portal*. Retrieved October 21, 2024, from <https://www.klimaschutz-portal.aero/glossar/saf-sustainable-aviation-fuels/>
- Schrepp, M. (2023, September 16). User Experience Questionnaire Handbook. Retrieved December 12, 2024, from <https://www.ueq-online.org/Material/Handbook.pdf>
- Street, F. (2021, September 16). The windowless cabin design that could be the future of air travel. Retrieved December 12, 2024, from <https://edition.cnn.com/travel/article/maverick-project-rosen-aviation-windowless-cabin/index.html>
- Viana, P. (2020, May 16). Die Boeing 777-300ER gewinnt auf dem Frachttransportmarkt an Bedeutung. Retrieved December 12, 2024, from <https://www.aeroflap.com.br/de/Die-Boeing-777-300er-gewinnt-auf-dem-Frachttransportmarkt-an-Bedeutung/>
- Wu, G. (2023, June 16). 7 Awesome Sites for Free Blender Textures. Retrieved December 12, 2024, from <https://www.makeuseof.com/free-textures-for-blender-sites/>
- Yang, Z., Long, Z., & Wang, G. (2019). Fast Heating Model for the Aircraft Cabin Air. *Energies*, 12(18), 3565. <https://doi.org/10.3390/en12183565>

Yoo, K.-I., Yoo, K.-E., & Lee, C.-K. (2013). A Study on the Improvement Methods on Cabin Safety Actions in Aircraft Accidents -Focused on Cabin Crew Safety Performances; Passenger Perceptions of Cabin Safety Information -. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 21(4), 126–136. <https://doi.org/10.12985/ksaa.2013.21.4.126>

# Anhang

## .1 Itempaare der verwendeten UEQ Dimensionen

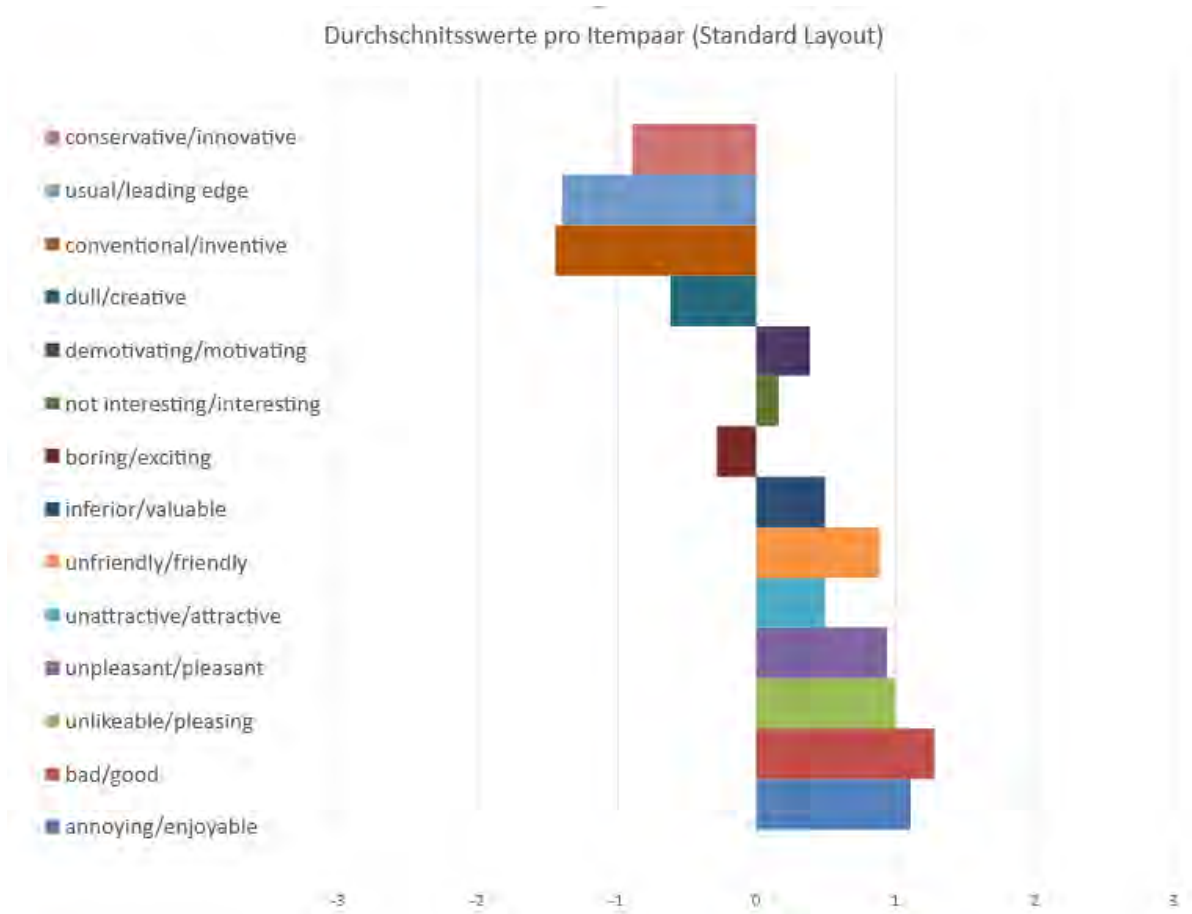


Figure 1: Itempaare des Standart Layouts

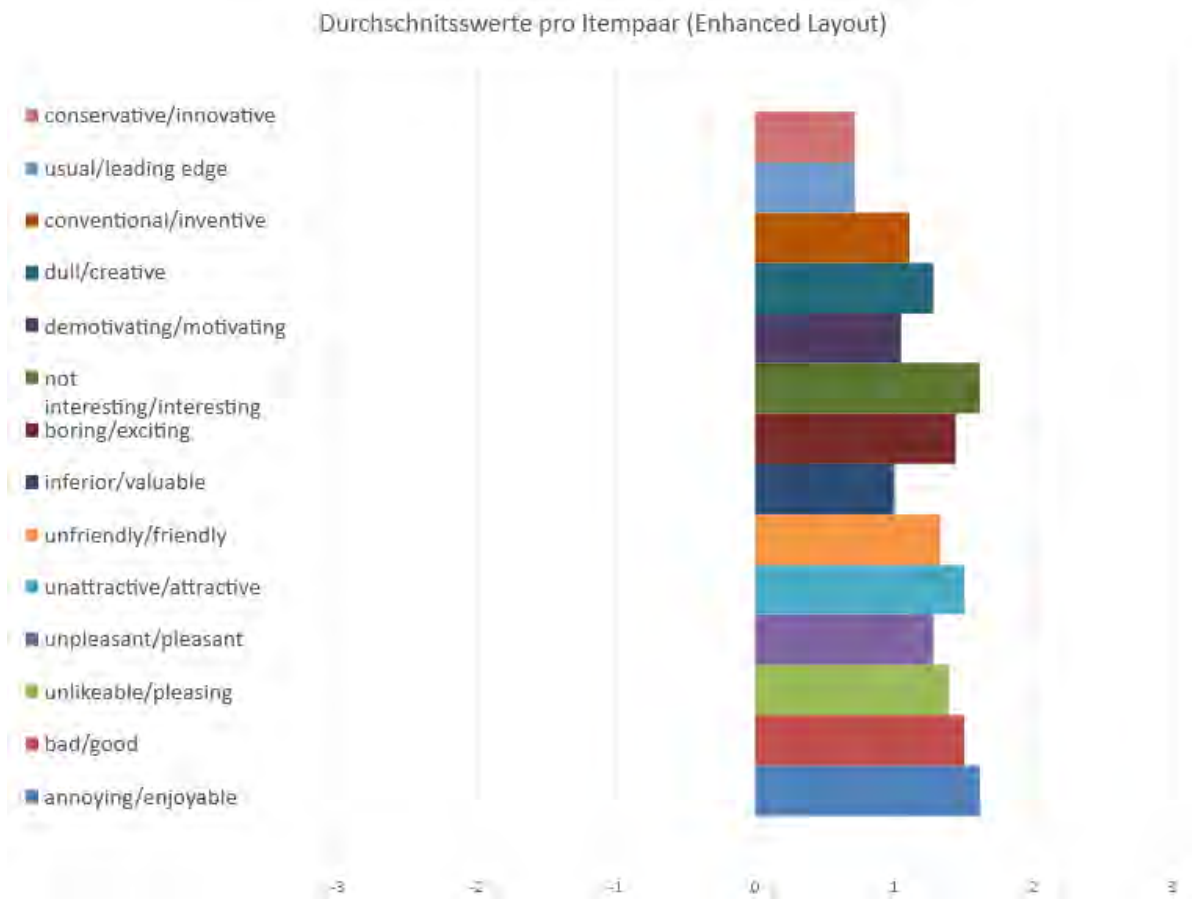


Figure 2: Itempaare des Enhanced Layouts

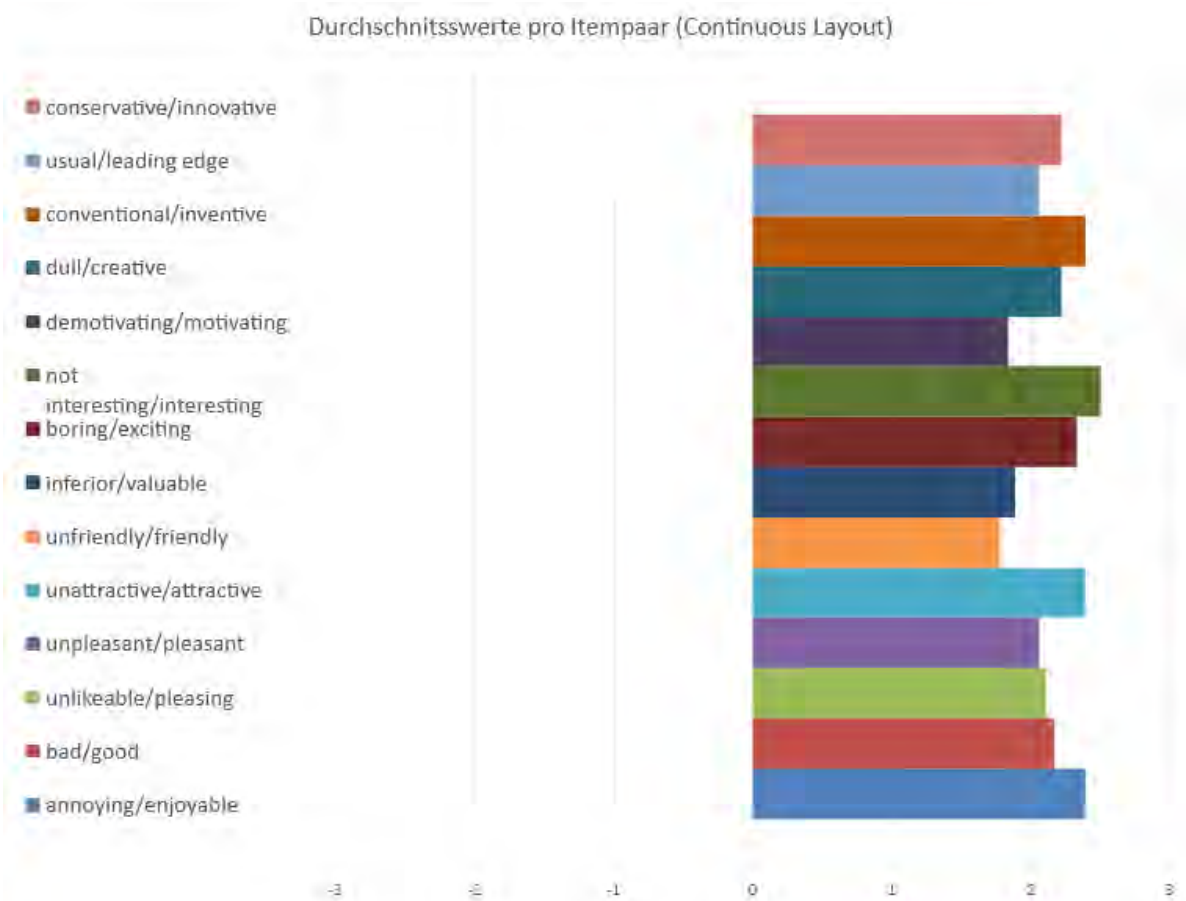


Figure 3: Itempaare des Continuous Layouts

# **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

## **Entwicklung einer VR Anwendung zur Untersuchung der Nutzerakzeptanz für zukünftige Kabinenkonzepte in der Luftfahrtindustrie**

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 20. Dezember 2024