



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Nils Lechner

Reparaturprozess eines Winglets: Problemvisualisierung mittels Virtual Reality

Nils Lechner

**Reparaturprozess eines Winglets:
Problemvisualisierung mittels Virtual Reality**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
DLR e.V. Institut für Instandhaltung und Modifikation
Wartungs- und Reparaturtechnologien
Hein-Saß-Weg 22
21129 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Netzel
Zweitprüferin: Dr.-Ing. Rebecca Rodeck

Industrieller Betreuer: Thore Keser

Abgabedatum: 12.05.2025

Kurzreferat

Nils Lechner

Thema der Arbeit

Reparaturprozess eines Winglets: Problemvisualisierung mittels Virtual Reality

Stichworte

Instandhaltung, Wartung, Reparatur, Überholung, Reparaturprozesse, Digitalisierung, Virtual Reality, Extended Reality, Winglet

Kurzzusammenfassung

In der Luftfahrtbranche stellen effiziente und zuverlässige Maintenance-, Repair- and Overhaul-Prozesse einen essenziellen Bestandteil des sicheren Flugbetriebs dar. Insbesondere bei der Reparatur komplexer Faserverbundbauteile wie Winglets treten in der Praxis häufig Ineffizienzen auf, etwa durch verschiedene Dokumentationsformen oder durch viele zu treffende Absprachen vieler beteiligter Akteure. Ziel dieser Arbeit war es, eine Virtual-Reality-Anwendung zu entwickeln, welche exemplarisch zwei zentrale Problemfelder im Reparaturprozess eines Winglets visualisiert. Durch eine immersive, interaktive Darstellung sollen Nutzer ein besseres Verständnis für Prozessineffizienzen erlangen. Die Anwendung wurde mit der Open-Source-Game-Engine Godot realisiert und anschließend mithilfe qualitativer und quantitativer Methoden evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass VR ein geeignetes Werkzeug zur Vermittlung komplexer Prozessstrukturen sein kann und insbesondere in der Schulung und Sensibilisierung von Personal Potenzial bietet. Abschließend werden Verbesserungsvorschläge sowie mögliche Einsatzszenarien in der industriellen Praxis diskutiert.

Nils Lechner

Title of Thesis

Repair Process of a Winglet: Visualization of Problems by Using Virtual Reality

Keywords

Maintenance, Repair, Overhaul, Digitalization, Repair processes, Virtual Reality, Extended Reality, Winglet

Abstract

In aviation industry, efficient and reliable maintenance, repair and overhaul processes are an essential part of safe flight operations. Especially when repairing complex composite components such as winglets, inefficiencies often occur in practice, for example due to different forms of documentation or many agreements to be made by many actors involved. The aim of this work was to develop a virtual reality application that visualizes two central problem areas in the repair process of a winglet as example. Through an immersive, interactive presentation, users should gain a better understanding of process inefficiencies. The application was realized with the open source game engine Godot and subsequently evaluated using qualitative and quantitative methods. The results show that VR can be a suitable tool for communicating complex process structures and offers potential, particularly in the training and sensitization of personnel. Finally, suggestions for improvement and possible application scenarios in industrial practice are discussed.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Aufbau der Arbeit	1
2 Maintenance, Repair and Overhaul	3
2.1 Definition	3
2.2 MRO in der Luftfahrt	5
3 Reparaturprozess eines Winglets	9
4 Virtual Reality	12
4.1 Definition und Einordnung	12
4.2 VR-Systemkomponenten	14
4.2.1 Ausgabegeräte	14
4.2.2 Eingabegeräte	16
4.3 Nutzung von VR	17
5 Problemvisualisierung mittels Virtual Reality	20
5.1 Konzeptioneller Ansatz und Ablauf	20
5.2 Verwendete Hard- und Software	21
5.2.1 Blender	21
5.2.2 Godot	21
5.2.3 HTC Vive Pro	22
5.3 Umsetzung	22
5.3.1 Movement und Funktionen (XRTools)	23
5.3.2 Navigation	24
5.3.3 Animationen und Interaktionen mit Akteuren	25
5.3.4 Virtuelles Tablet und Reparaturauftrag mit Stempel	26
6 Validierung	29
6.1 Methodik	29
6.1.1 Anwendungsspezifische Fragen	29
6.1.2 User Experience Questionnaire	29
6.1.3 NASA Task Load Index	30
6.2 Ergebnisse	31
6.2.1 Demografie	31
6.2.2 UEQ	31
6.2.3 NASA TLX	33
6.2.4 Anwendungsspezifische Fragen	35
6.3 Diskussion	36

7	Zusammenfassung	39
8	Fazit und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	43
	Anhang	48

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wartungsansätze	4
2.2	Vereinfachte Übersicht für MRO-Service- und Ersatzteilfluss und typische Akteure	6
2.3	Maintenance Program Supporting Documents	7
3.1	Durch Blitzeinschlag beschädigtes Winglet	9
3.2	Prozessschritte Faserverbundbauteil-Reparatur	10
3.3	Toplevel Prozessschritte Winglet-Reparatur	10
3.4	Dauer der individuellen Prozessschritte	11
4.1	Schematische Einordnung von Reality-Formaten	12
4.2	Reality-Virtuality Kontinuum	13
4.3	Augmented Reality in der Pokémon GO App	13
4.4	Vergleich AR und VR	13
4.5	VR-System	14
4.6	Nutzer mit HTC VIVE Pro HMD und Controllern [39]	15
4.7	VR-Handschuh SenseGlove Nova 2 [40]	15
4.8	Haptischer Ganzkörperanzug Teslasuit (Ein- und Ausgabegerät) [48]	17
4.9	Omnidirektionales Laufband Omni One der Firma Virtuix [49]	17
5.1	VR-Umgebung	23
5.2	Navigations-Viewport	24
5.3	UI Skript (Beispiel)	25
5.4	Main-Viewport Funktion (unten) und Beispiel für Aufruf (oben)	25
5.5	Key Poses	26
5.6	Tablet mit Startbildschirm-UI	27
5.7	Damage Report	27
5.8	Kamera-App	27
5.9	Damagereport mit hinzugefügtem Foto	27
5.10	Reparaturauftrag vor dem Stempeln	28
5.11	Reparaturauftrag nach dem Stempeln	28
6.1	Skalenstruktur des UEQ	30
6.2	Vorerfahrung der Teilnehmer mit VR	31
6.3	UEQ-Auswertungen	32
6.4	UEQ-Auswertungen ohne Extremwerte	32
6.5	Vergleich mit Anwendungen aus Datenbank	33
6.6	Ergebnisse NASA TLX mit Standardabweichung	34

Tabellenverzeichnis

5.1	Genutzte XRTools	24
6.1	Ergebnisse UEQ-Skalen	32
6.2	Interpretation des NASA TLX [69]	33
6.3	Ergebnisse NASA TLX	34
6.4	Ergebnisse anwendungsspezifische Fragen	35

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
CAD	Computer-aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FOV	Field of View
HMD	Head-Mounted Display
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
MR	Mixed Reality
MRBR	Maintenance Review Board Report
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA TLX	NASA Task Load Index
NDT	Nondestructive Testing
NTSB	National Transportation Safety Board
OAMP	Operator's Approved Maintenance Program
OEM	Original Equipment Manufacturer
PC	Personal Computer
RVK	Reality-Virtuality Kontinuum
TAT	Turnaround Time
UEQ	User Experience Questionnaire
UI	User Interface
UNO	United Nations Organization
VR	Virtual Reality
WT	Working Time
XR	Extended Reality

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Der Wartungs- und Instandhaltungssektor (Maintenance, Repair and Overhaul (MRO)) gewinnt in der Luftfahrtbranche zunehmend an Bedeutung. Gründe dafür sind nicht nur ökonomischer Natur, etwa durch den hohen Kostendruck im Luftverkehr, sondern auch ökologische Anforderungen und strenge sicherheitsrelevante Vorschriften. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, erfährt der Sektor fortlaufend Weiterentwicklungen und Verbesserungen [1].

Die Einführung neuer Technologien sowie der verstärkte Einsatz moderner Materialien wie Faserverbundwerkstoffe erfordern eine kontinuierliche Anpassung bestehender Verfahren. Gleichzeitig steigen die regulatorischen Anforderungen: Mitarbeitende müssen zahlreiche Zertifizierungen erfüllen und hochspezialisiertes Wissen aufbauen, was umfangreiche Schulungsmaßnahmen erforderlich macht. Dies stellt eine erhebliche Belastung für Unternehmen und Beschäftigte dar [2][3][4].

Trotz dieser Entwicklungen bleibt die Betrachtung der MRO-Prozesse in der Praxis häufig auf einzelne Prozessschritte fokussiert, während das Zusammenspiel dieser Schritte im Gesamtprozess nur unzureichend analysiert wird. Die Folge sind Ineffizienzen, wie zum Beispiel Wartezeiten. Zudem gestaltet sich die Darstellung und Reproduzierbarkeit der Prozesse aufgrund ihrer Komplexität schwierig, was Schulung, Analyse und Optimierung erschwert.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, setzen immer mehr Unternehmen auf innovative digitale Hilfsmittel wie Virtual Reality (VR). VR ermöglicht erwiesenermaßen durch das „Eintauchen“ des Nutzers in eine virtuelle Umgebung eine verbesserte Lern- und Aufnahmefähigkeit, sowie ein gestiegenes Engagement der Nutzer beim Lernen der Informationen [5][6][7].

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Virtual-Reality-Anwendung, die zwei exemplarische Probleme des Winglet Reparaturprozesses visualisieren soll. Im Fokus steht dabei nicht die Vermittlung einzelner Arbeitsschritte oder die Durchführung der Reparatur selbst, sondern die Darstellung der Probleme, die sich negativ auf die Effizienz des Gesamtprozesses auswirken können.

Die Anwendung soll es den Nutzern ermöglichen, das gewählte Problem in einer realitätsnahen, interaktiven Umgebung zu erleben und dadurch ein tieferes Verständnis für die zugrunde liegenden Ineffizienzen des Prozessablaufs zu entwickeln. Auf diese Weise wird untersucht, inwiefern VR zur Vermittlung dieser Probleme geeignet ist.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zuerst werden in Abschnitt 2 MRO Prozesse im Allgemeinen und Besonderheiten von ihnen in der Luftfahrt erläutert. Anschließend wird in Abschnitt 3 auf den speziellen MRO-Prozess der Wingletreparatur anhand der Veröffentlichungen von Aigner et al. [2][3] eingegangen. In

Abschnitt 4 wird die Technologie Virtual Reality (VR) als Werkzeug für technische Anwendungen vorgestellt und eingeordnet, sowie aktuelle Anwendungsfälle besprochen. Aus den gewonnenen Grundlagen der ersten drei Kapitel wurde die VR-Anwendung entwickelt, welche in Abschnitt 5 beschrieben wird. Anschließend wird diese in Abschnitt 6 validiert und diskutiert. In Abschnitt 7 werden die zentralen Inhalte der Arbeit kompakt zusammengefasst. Darauf aufbauend fasst Abschnitt 8 die gewonnenen Erkenntnisse zusammen, diskutiert deren Bedeutung und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen.

2 Maintenance, Repair and Overhaul

2.1 Definition

Die Begriffe Maintenance, Repair und Overhaul (kurz MRO) stehen für „alle Aktivitäten, welche den Ist-Zustand bewerten und den Soll-Zustand gewährleisten oder wiederherstellen“ [8]. Ins Deutsche übersetzt spricht man von Wartung, Reparatur und Überholung und diese drei Begriffe können auch als Instandhaltung zusammengefasst werden. Im Folgenden werden die einzelnen Begriffe genauer erklärt:

Maintenance (Wartung) umfasst Maßnahmen die in der Regel regelmäßig und geplant stattfinden und beinhaltet unter anderem Inspektion, Reinigung, Austausch von Verschleißteilen und Tests von Geräten, Anlagen oder anderen technischen Systemen, um die Funktionsfähigkeit festzustellen und Ausfälle zu vermeiden. Die Durchführung der Wartung lässt sich, wie in Abbildung 2.1 zu sehen, in drei Ansätze aufteilen, die im Folgenden genauer erklärt werden:

Die **vorbeugende Wartung** (Preventive Maintenance) ist laut Green [9] die Grundlage der MRO-Maßnahmen. Die Maßnahmen werden hier in einer Routine in regelmäßigen Zeitintervallen durchgeführt. Die Länge dieser Zeitintervalle werden meist anhand von Erfahrungswerten festgelegt, jedoch kann es bei dieser Wartungsmethode auch vorkommen, dass eine Wartung durchgeführt wird, obwohl sie erst später nötig wäre. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, potentielle, in der Zukunft auftretende Probleme zu vermeiden.

Der Ansatz der **vorausschauenden Wartung** (Predictive Maintenance) basiert auf Daten, anhand derer Zustand einer Anlage oder ähnlichem in Echtzeit bestimmt und potentielle Ausfälle vorhergesagt werden können. Diese Daten werden mit Sensoren und einer dazugehörigen Infrastruktur aufgenommen. So kann der Zeitpunkt der Wartung genau bestimmt werden und im Gegensatz zur vorbeugenden Wartung können unnötige, zu frühe Wartungsarbeiten vermieden werden [10]. Dadurch ist dieser Ansatz sehr effizient, jedoch müssen auch die Kosten für die Sensorik berücksichtigt werden. Aktuell wird viel an der Entwicklung vorausschauender Wartungsmethoden gearbeitet und sie werden in der Zukunft eine immer größere Rolle spielen. So sind einer Umfrage der Statista GmbH [11] zufolge 77% der befragten Personen der Meinung, dass vorausschauende Wartung eine Voraussetzung ist, um in Zukunft wettbewerbsfähig zu bleiben und 80% glauben, dass sie essenziell ist und in Zukunft noch wichtiger wird.

Die **korrigierende Wartung** (Corrective Maintenance) ist eine Reaktion auf einen Ausfall oder einen Schaden. Die Betriebsbereitschaft der Anlage wird durch Reparaturen und/oder den Austausch beschädigter Komponenten wiederhergestellt [9]. Die Vorfälle, die diese Form der Wartung notwendig machen, gilt es zu reduzieren, da durch hohe Ausfallzeiten und teure Reparaturen potentiell hohe Kosten entstehen. Jedoch lässt sie sich nicht komplett vermeiden und spielt daher auch eine wichtige Rolle.

Repair (Reparatur) beinhaltet verschiedene Maßnahmen zur Behebung von Problemen und überschneidet sich daher stark mit der zuvor erwähnten korrigierenden Wartung. Die Reparatur findet entweder routinemäßig zur Behebung kleinerer, oft auftretender Probleme statt oder als Notreparatur, wenn kritische Bauteile betroffen sind und die betroffene Anlage oder das betroffene Gerät deshalb ausfällt. Wenn Reparaturen erhebliche Investitionen fordern, weil zum Beispiel gleich mehrere Bauteile eines technischen Systems defekt sind, wird auch von einer Kapitalreparatur gesprochen [9]. Schnelle Reparaturen sind zum einen von Bedeutung, um für möglichst geringe Ausfallzeiten zu sorgen, aber auch, um Gesamtausfälle von Systemen zu verhindern, die durch Vernachlässigungen kleinerer Probleme auftreten können und so hohe



Abbildung 2.1: Wartungsansätze [12]

Kosten verursachen. Darüber hinaus können sie vor allem im Bereich des Verkehrs oder der Medizintechnik auch zu großen Sicherheitseinbußen führen. Zur Veranschaulichung kann sich die Radbefestigung eines Autoreifen vorgestellt werden, bei der eine Schraube bricht. Durch die fehlende Schraube wird vermutlich nicht direkt der Reifen abfallen, jedoch steigt die Beanspruchung der verbliebenen Schrauben, sodass weitere Schraubenbrüche wahrscheinlicher werden. Wenn der Reifen sich dann während der Fahrt komplett löst, kommt es zu größeren Beschädigungen, die kostenintensiver zu beseitigen sind, als wenn direkt die defekte Schraube repariert oder ersetzt worden wäre.

Der Begriff **Overhaul** (Überholung) steht für eine umfassende Instandhaltungsmaßnahme, die die komplette Zerlegung eines Systems in seine Einzelteile und die darauf folgende Inspektion, Reinigung und unter Umständen Reparatur dieser Komponenten beinhaltet. Bei dieser Maßnahme soll das System möglichst wieder in seinen Ausgangszustand, also nach Auslieferung durch den Erstausrüster (englisch: Original Equipment Manufacturer, im folgenden kurz OEM genannt) gebracht werden. In der Regel werden diese sehr aufwändigen und kostenintensiven Maßnahmen in regelmäßigen Zeitintervallen durchgeführt. Als ein Beispiel können hier der C- und D-Check von Flugzeugen genannt werden, die in Intervallen von 18-24 Monaten (C-Check) beziehungsweise 6-10 Jahren (D-Check) [13] durchgeführt werden und bei denen mehr oder weniger umfangreiche Demontagen von Einzelkomponenten stattfinden.

MRO-Prozesse sind also für Unternehmen von großer Bedeutung, da sie eine dauerhafte Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von Anlagen sicherstellen und so Kosten für Ausfälle und Neuanschaffungen reduzieren, vor allem wenn die Anlagen sehr teuer sind und eine lange Lebensdauer haben sollen. Ein weiterer Aspekt, durch den MRO-Prozesse immer mehr in den Fokus geraten, ist das durch den Klimawandel gestiegene Interesse an Nachhaltigkeit, welches eine möglichst lange Lebensdauer und ressourcenschonende Instandhaltung von Anlagen beinhaltet. Daher wird der MRO-Markt in der nächsten Zukunft wachsen, laut Mordor Intelligence [14] von 440,81 Milliarden US-Dollar im Jahr 2024 auf 493,4 Milliarden im Jahr 2029. Zum MRO-Sektor gehören jedoch nicht nur zum Beispiel Werkstätten und Servicetechniker, die die direkte Instandhaltung an der Anlage durchführen, sondern auch die dazugehörigen Bereiche wie die Prozesssteuerung und Arbeitskoordination, Materialien (zum Beispiel zum Ersetzen von Verschleißteilen aber auch Reinigungsmittel etc.) und deren Lagerung, Logistik und Personal [8].

2.2 MRO in der Luftfahrt

In der Luftfahrtbranche spielen neben den oben genannten ökonomischen und ökologischen Aspekten vor allem Sicherheitsaspekte eine wichtige Rolle [1]. Rechtzeitig und regelmäßig durchgeführte MRO-Prozesse sind eine Voraussetzung für einen sicheren Flugbetrieb eines Flugzeuges und sind daher essentiell in der Luftfahrtindustrie. In der Vergangenheit gab es bereits Zwischenfälle und Abstürze durch Versagen von Komponenten aufgrund schlecht geplanter oder mangelhaft durchgeführter Wartung. Ein Beispiel ist hierfür der Absturz des Alaska-Airlines-Fluges 261 im Januar 2000 in der Nähe von Los Angeles, bei dem alle Personen an Bord ihr Leben verloren. Grund des Absturzes war das Versagen des Gewindes einer Spindelmutter in der Trimmvorrichtung des Höhenleitwerks durch Verschleiß, wodurch sich das Höhenruder frei bewegen konnte und es zu einem starken Höhenabfall kam. Nach Untersuchungen gab das National Transportation Safety Board (NTSB), eine US-amerikanische Behörde für Transportsicherheit, in einem Bericht bekannt, dass der Verschleiß durch eine unzureichende Schmierung der Spindel entstanden ist, auf der sich die Spindelmutter befand. Diese unzureichende Schmierung konnte auf ein verlängertes Intervall dieser MRO-Aufgabe zurückgeführt werden [15]. Damit steht dieser Unfall in direktem Zusammenhang mit einem fehlerhaften MRO-Prozess.

Flugzeugbesitzer im kommerziellen Sektor (zum Beispiel Fluggesellschaften) haben ein Interesse daran, Flüge so sicher aber auch so kosteneffizient wie möglich durchzuführen. Durch die hohen Investitionskosten zur Anschaffung eines Flugzeugs können sich diese nur rentieren, wenn sich das Flugzeug dauerhaft im regulären Flugbetrieb befindet, was durch MRO-Prozesse sichergestellt wird [2]. Da MRO-Aufgaben am Boden durchgeführt werden, gilt es laut Deckert et al. [8] „die Wartungszeiten so gering wie möglich zu halten und bei höchsten Sicherheitsstandards eine hohe Lebensdauer einzelner Komponenten und letztendlich des gesamten Flugzeugs zu erreichen“. Es gilt also in so wenig Zeit wie nötig so viele Wartungsaufgaben wie möglich zu erfüllen. Die Kosten der MRO-Prozesse haben einen erheblichen Anteil an den Flugkosten für eine Fluggesellschaft, laut Viera et al. [16] typischerweise 12-15%, und laut Deckert et al. [8] können diese größer als die Kerosin- oder Crewkosten bei typischen Linienflugzeugen sein. Randall et al. [17] zufolge können die Kosten für komplexe Systeme wie zum Beispiel Passagierflugzeuge, die nach der Produktion und Inbetriebnahme anfallen, die Produktionskosten um das zwei- oder dreifache übersteigen.

Die hohen Sicherheitsanforderungen an Flugzeuge werden durch viele international standardisierte Regularien überwacht und teilweise festgelegt, wofür verschiedene Luftfahrtbehörden wie die European Union Aviation Safety Agency (EASA), die US-amerikanische Federal Aviation Administration (FAA) sowie die der United Nations Organisation (UNO) angehörigen International Civil Aviation Organisation (ICAO) verantwortlich sind [1]. Auch alle MRO-Prozesse unterliegen diesen Regularien. So gibt es Regeln zur kontinuierlichen Lufttüchtigkeit von Luftfahrzeugen mit Vorschriften für Inspektionen, Reparaturen aber auch der dazugehörigen Dokumentationen (EASA Part-M oder FAA FAR Part 43) aber auch Anforderungen an MRO-Personal (EASA Part-66, FAA FAR Part 65) und MRO-Betriebe (EASA Part-145, FAA FAR Part 145). Betriebe wie auch Personal müssen auch nach dem jeweiligen Regelwerk von der zuständigen Behörde lizenziert werden [8]. Das führt dazu, dass nur eine relativ kleine Anzahl an MRO-Betrieben diese Anforderungen überhaupt erfüllen und somit die Konkurrenz eher klein ist [18].

Die vier essentiellen Akteure der MRO-Industrie in der Luftfahrt sind Zulieferer von Systemen und Komponenten, Flugzeughersteller (im Folgenden OEM, Abkürzung von Original Equip-

ment Manufacturer, genannt), MRO-Werkstätten sowie die Kunden. Aufgrund der hohen Anzahl an MRO-Aufgaben und der geringen Anzahl an lizenzierten Akteuren bieten einige Akteure Ersatzteile und die Durchführung von MRO-Services an, beliefern aber auch untypischerweise andere Akteure, mit denen sie in direkter Konkurrenz stehen [16]. Das Zusammenspiel einiger beispielhafter Akteure zeigt Abbildung 2.2.

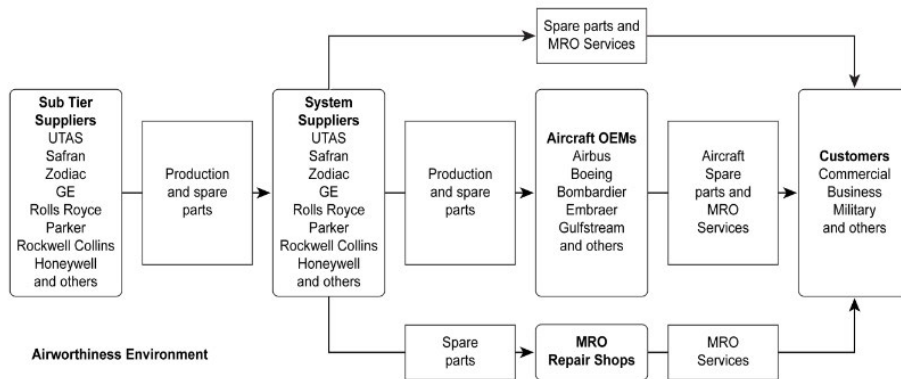


Abbildung 2.2: Vereinfachte Übersicht für MRO-Service- und Ersatzteilfluss sowie typische Akteure [16]

In der Luftfahrt werden MRO-Aktivitäten in geplant oder ungeplant aufgeteilt [19]. Ungeplante MRO-Aktivitäten werden durch Vorkommnisse durchgeführt, wie zum Beispiel ein defektes Bauteil. Aber auch unplanmäßige Inspektionen nach zum Beispiel einem sehr starkem Aufsetzen bei einer Landung gehören zu den ungeplanten MRO-Aktivitäten. Die geplanten Aktivitäten gehören zu der in 2.1 beschriebenen Preventive Maintenance und werden in festgelegten Intervallen durchgeführt (meist in Flugstunden angegeben) [19].

Eine weitere Unterteilung kann in MRO-Aktivitäten, die am Flugzeug durchgeführt werden können, und MRO-Aktivitäten, die das Abmontieren der zu instandhaltenden Komponente erfordern, vorgenommen werden. Um den Zeitaufwand zu reduzieren, werden die abmontierten, beschädigten Komponenten teilweise durch funktionsfähige ersetzt, sodass das Flugzeug weiterfliegen kann [16].

Außerdem wird in der Luftfahrt zwischen Base- und Line Maintenance unterschieden. Line Maintenance umfasst alle Aktivitäten, die die Bewahrung des Soll-Zustands als Ziel haben, während die Base Maintenance alle Maßnahmen zur Wiederherstellung des Soll-Zustandes beinhaltet [1]. Außerdem wird die Line Maintenance vor allem parallel zum Flugbetrieb zwischen Flügen oder über Nacht durchgeführt, während für die Base Maintenance Ausfallzeiten des Flugzeuges nötig sind [20].

Die Mindestinstandhaltungsanforderungen, die erfüllt werden müssen, werden von den OEMs für jeden neuen Flugzeugtypen erstellt und im Maintenance Review Board Report (MRBR) dokumentiert. Dieser muss anschließend von der zuständigen Behörde geprüft und genehmigt werden. Anschließend wird in Zusammenarbeit verschiedener Ausschüsse und Arbeitsgruppen, bestehend aus OEMs, Behörden, Flugzeugbetreibern und MRO-Betrieben mit dem MRBR als Rahmen das Maintenance Planning Document erstellt. Dieses enthält alle empfohlenen Instandhaltungsaufgaben und -anweisungen, die die Fluggesellschaften benötigen, um individuelle Instandhaltungsprogramme zu erstellen, die Operator's Approved Maintenance Program (OAMP) genannt werden. Aus diesen werden wiederum verschiedene Maintenance Program Supporting Documents abgeleitet, ein Überblick dazu liefert Abbildung 2.3 [18].

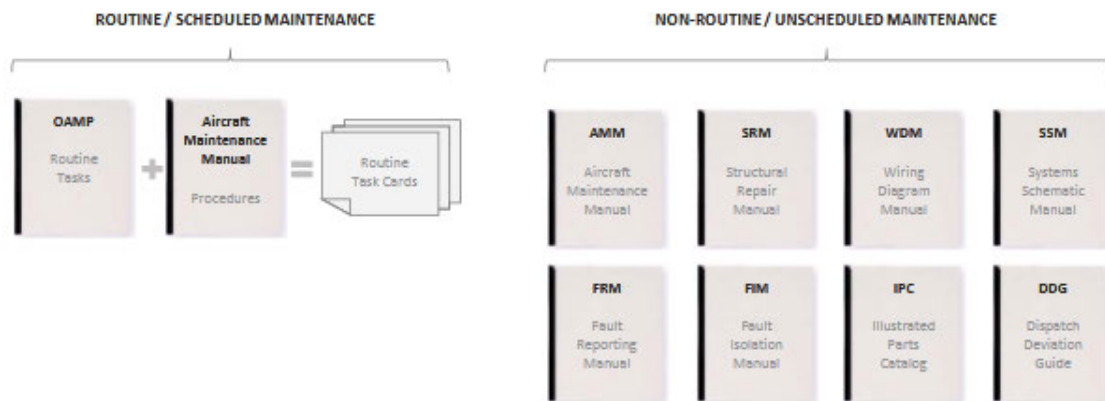


Abbildung 2.3: Maintenance Program Supporting Documents [18]

Eine klassische Methode, mit der Flugzeugbetreiber Instandhaltungsaufgaben auf einzelne Termine aufteilen, ist die routinemäßige Durchführung von sogenannten Letter Checks. Diese beinhalten A-, B-, C- und D-Checks [8] sowie Transit- und 48h-Checks [16], auf die im Folgenden genauer eingegangen wird:

Die **Transit- und 48h-Checks** werden üblicherweise nach jeder Landung durchgeführt. Sie beinhalten eine visuelle Inspektion des Flugzeuges, um offensichtliche Schäden zu bemerken sowie der Überprüfung von diversen Flüssigkeitsständen (Hydraulikflüssigkeit, Enteisiger etc.) und Notfallequipment [16].

Der **A-Check** wird durchschnittlich alle 500 Flugstunden bzw. alle 2 Monate durchgeführt. Er beinhaltet detailliertere visuelle Überprüfungen sowie Überprüfungen verschiedener Systeme. Ein Beispiel hierfür ist der Drucktest für das Sauerstoffsystem der Crew. Zu diesem Zweck werden unter anderem Paneele demontiert, um den Zugang zu bestimmten Systemen zu gewährleisten, ohne jedoch umfangreiche Demontagearbeiten durchzuführen. Es werden spezielle Werkzeuge, Know-How sowie Testequipment benötigt. Der australischen Fluggesellschaft Qantas zufolge dauert dieser Check, in Abhängigkeit vom Zustand und gefundenen Mängeln, zwischen 6 und 24 Stunden. Der **B-Check** ähnelt dem A-Check und ist eine umfangreichere Version von ihm. Er wird durchschnittlich alle 1100 Flugstunden bei älteren Flugzeugmodellen wie der Boeing 737-200 oder 747-200 durchgeführt, bei aktuelleren wird er nicht mehr durchgeführt und die Aktivitäten werden auf andere Checks verteilt [20].

Der **C-Check** (auch Base-Check genannt [21]) ist der erste richtig große Check eines Flugzeuges und wird ca. alle 4000 Flugstunden [16] bzw. alle anderthalb bis zwei Jahre [21] durchgeführt. Er beinhaltet eine genaue Untersuchung der Flugzeugstruktur, wofür alle Verkleidungen entfernt werden und zum Beispiel mittels Ultraschallverfahren Überprüfungen angestellt werden. Außerdem werden bestimmte Bauteile präventiv ersetzt. Die Dauer der Ausfallzeit liegt etwa bei ein bis zwei Wochen bzw. 5000 Arbeitsstunden [22]. Beim C-Check sowie auch bei dem noch folgenden D-Check werden in der Regel dann der A- und B-Check auch direkt mit durchgeführt [16]. Einige Fluggesellschaften nutzen die Demontage von Kabinenkomponenten, wie Verkleidungen, Sitzen und Toiletten, und die Ausfallzeit, um die Kabinen zu modernisieren oder modifizieren [20].

Am umfangreichsten ist der **D-Check**. Er beinhaltet eine komplette Zerlegung des Flugzeugs bis auf die Grundstruktur, Triebwerke und Fahrwerke werden demontiert und sogar die Lackierungen entfernt. Anschließend wird jedes Bauteil untersucht und bei Bedarf ersetzt. Je nach Quelle liegt zwischen dem C- und dem D-Check noch der First Heavy Maintenance Visit, bei

dem die Struktur noch intensiver auf Korrosion oder Beschädigungen untersucht wird und der ca. alle 6 Jahre stattfindet. Darauf folgt dann ca. alle 10-12 Jahre der D-Check (auch Second Heavy Maintenance Check genannt) [20][21]. Bei anderen Autoren werden die beiden Checks zusammengelegt und finden alle 6-10 Jahre statt [16]. Die Ausfallzeit des Flugzeuges beträgt hier zwischen 4 und 6 Wochen [21] bzw. zwischen 30.000 bis 50.000 Arbeitsstunden [1] und es können je nach Flugzeugtyp Kosten von bis zu mehreren Millionen Euro entstehen [20].

Ausgenommen von diesen Checks ist in der Regel die Triebwerkswartung, die gesondert je nach Triebwerkstyp in individuellen Intervallen und zum Teil auch von besonderen MRO-Betrieben durchgeführt wird. Hierfür müssen diese ca. alle vier Jahre vom Flugzeug abmontiert werden [21].

Da jede Fluggesellschaft eigene Instandhaltungsplanungen vornimmt, unterscheiden diese sich auch stark voneinander. Die genannten Checks fallen alle in die Kategorie der in Kapitel 2.1 beschriebenen präventiven Wartung. Da auch in der Luftfahrt der Trend zur prädiktiven bzw. vorausschauenden Wartung geht, werden diese Checks bei modernen Flugzeugen nicht mehr so starr angesetzt. So werden die Aufgaben eines größeren Checks oft auf mehrere kleinere aufgeteilt, um Standzeit zu reduzieren [20]. Außerdem wird vermehrt auf Sensorik und Echtzeitdaten gesetzt, um Arbeiten nur dann durchzuführen, wenn sie auch nötig sind [8]. Auch der vermehrte Einsatz von Faserverbundtechnologien als Ersatz für metallische Werkstoffe bringt einen Wandel in der Flugzeuginstandhaltung mit sich, da bei Faserverbundwerkstoffen Schäden wie Korrosion quasi wegfallen [20], aber dafür andere, wie Delaminationen auftreten können.

3 Reparaturprozess eines Winglets

Als Inhalt der Anwendung, die im Rahmen dieses Projektes erstellt wurde, ist der Reparaturprozess eines Winglets. Winglets leisten einen wichtigen Beitrag zu aerodynamischen Effizienz eines modernen Verkehrsflugzeuges und Beschädigungen an Ihnen können zu hohen Ausfallzeiten führen. Der Prozess ist der in Abschnitt 2.1 erwähnten Notfallreparatur zuzuordnen, er wird also nicht planmäßig durchgeführt, sondern nur, wenn er durch ein Ereignis (Beschädigung des Winglets) notwendig wird. Beschädigungen können am Winglet während des Fluges durch Blitzeinschläge (siehe Abbildung 3.1) oder Aufprallschäden durch zum Beispiel Vögel entstehen, aber auch über die Zeit durch Eindringen von Wasser oder am Boden zum Beispiel durch Kollisionen mit Flughafenfahrzeugen [23].



Abbildung 3.1: Durch Blitzeinschlag beschädigtes Winglet [24]

Bei Verkehrsflugzeugen wird vermehrt auf die Nutzung von Faserverbundwerkstoffen zurückgegriffen, da diese ein geringes Gewicht bei hoher Belastbarkeit aufweisen. Im Vergleich zu Aluminium bringen sie eine Gewichtseinsparung von bis zu 30% [25]. Dieser Prozess begann bei den Sekundärstrukturen eines Flugzeuges, also Strukturen, die nicht primär lasttragende Funktionen erfüllen, zu denen in der Regel auch Winglets gezählt werden [26]. Inzwischen werden Faserverbundwerkstoffe in allen Bereichen eines Flugzeuges genutzt. So hat der Airbus A350 einen Faserverbundanteil von über 50% [25]. Faserverbundwerkstoffe weisen starke Unterschiede in den Materialeigenschaften im Vergleich zu den klassisch verbauten Aluminiumlegierungen auf, und unterscheiden sich daher auch in der Reparatur. So sind diese zwar weniger korrosionsanfällig, jedoch weisen sie ein anisotropes Verhalten auf, die Materialeigenschaften sind also richtungsabhängig, je nach Lage der Fasern. Bei Faserverbundwerkstoffen können unsichtbare, innere Schäden wie Delaminationen und Matrixrisse auftreten, deren Detektion spezielle zerstörungsfreie Prüfverfahren (non-destructive testing, im Folgenden NDT), wie zum Beispiel Ultraschall, erfordern. Die Reparatur von Faserverbundstoffen ist häufig aufwendiger, da mit Harzen und Klebeverbindungen gearbeitet wird, die nur unter bestimmten Bedingungen wie geringer Luftfeuchtigkeit und Temperatur aushärten [27].

Der Reparaturprozess von Faserverbundwerkstoffen (und damit auch von Winglets) kann in verschiedene Prozessschritte aufgeteilt werden, die in Abbildung 3.2 zu sehen sind. Er wird durch einen Vorfall ausgelöst, wie zum Beispiel ein Blitzeinschlag, und einer anschließenden Überprüfung des betroffenen Bauteils. Wird ein Schaden festgestellt, wird dieser genauer, mithilfe von NDT-Verfahren inspiziert. Die Ergebnisse der Inspektion werden daraufhin bewertet und ein Vorgehen zur Behebung der Schäden festgelegt. Im Anschluss wird die konkrete Planung, also die direkte Zuweisung von Arbeitsschritten und Bestellung von benötigten Materialien, durchgeführt. Erst dann kann mit der eigentlichen Reparatur begonnen werden. Die Reparatur umfasst auch die Überprüfung der Reparaturmaßnahmen durch erneute Anwendung von NDT-Verfahren und das anschließende Lackieren des Bauteils. Zum Abschluss wird die Dokumentation der Reparatur vervollständigt, wobei bereits fast alle vorher genannten Prozessschritte Dokumentationen beinhalten [4].



Abbildung 3.2: Prozessschritte Faserverbundbauteil-Reparatur [4]

Aigner et al. [2] [3] beschäftigen sich in den beiden Veröffentlichungen mit der Prozessoptimierung für Faserverbundreparaturen in der Luftfahrt. Hierfür wurde im Rahmen der Forschung für die Veröffentlichungen ein aktueller Reparaturprozess eines Winglets bei einem MRO-Betrieb begleitet und alle Prozessschritte digital dokumentiert, um einen Überblick zu bekommen. Die Prozessschritte wurden anschließend von der Autorin in einer ereignisgesteuerten Prozesskette dargestellt. Diese wird nicht vollständig in den Veröffentlichungen gezeigt, ist aber eine Grundlage von ihnen und konnte für diese Arbeit genutzt werden. Das Toplevel dieser Prozesskette ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Jeder Prozessschritt beinhaltet weitere Prozessketten, die teilweise auch wieder Prozessketten beinhalten. Die Prozesskette ist die Grundlage der in Abschnitt 5 beschriebenen Virtual Reality Anwendung.

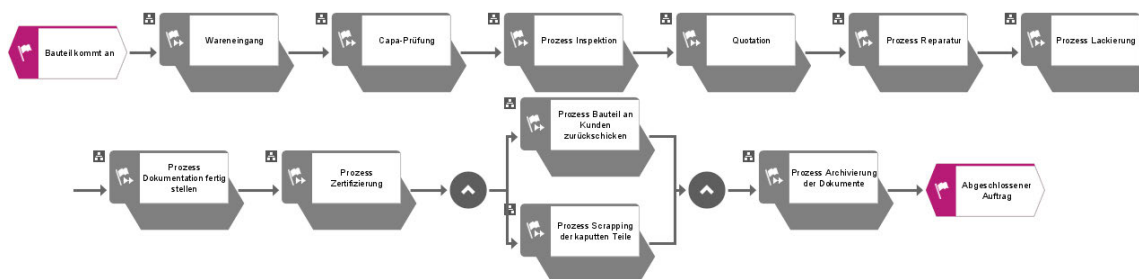


Abbildung 3.3: Toplevel Prozessschritte Winglet-Reparatur

Beobachtungen der Autoren bei dem Prozess waren, dass der Prozess vorwiegend manuell abläuft und der Fokus auf den einzelnen Prozessschritten liegt, nicht auf der gesamten Prozesskette. Die Dokumentation erfolgt oft im Papierformat und wird erst nach Fertigstellung eines Arbeitsschrittes digitalisiert. In anderen Prozessschritten wird jedoch auch mit anderen Dokumentationsformaten gearbeitet, wodurch die Dokumentationsformate uneinheitlich werden und einige Informationen von dem einen Dokumentationsformat kopiert und in ein anderes eingefügt werden müssen. So werden die Prozessabschnitte schrittweise nacheinander geplant, da Informationen oft erst nach einer Übergabe durch die Akteure des vorherigen Prozessabschnittes an die des Nächsten weitergegeben werden können. Dadurch entstehen lange Planungs- und Wartezeiten durch mangelnde Vorausplanung. Die Anteile der verschiedenen Prozessschritte an der Gesamtzeit sind in Abbildung 3.4 zu sehen. Die Abkürzung „TAT“ steht für turnaround time, also die Dauer der Gesamtprozesses. „WT“ steht für working time und beschreibt die Zeit, die aus der Summe aller Arbeitsstunden hervorgeht, die von allen beteiligten Akteuren an der Reparatur gearbeitet wurde. Die TAT kann also länger als die WT sein, da sie auch Wartezeiten beinhaltet, jedoch auch kürzer, wenn mehrere Personen gleichzeitig arbeiten. Die TAT ist also für den Kunden von Bedeutung, da sie angibt, wann das Bauteil wieder einsatzbereit ist.



Abbildung 3.4: Dauer der individuellen Prozessschritte [2]

Die Autoren haben festgestellt, dass 40% der Gesamtprozessdauer für Wartezeit anfallen und 14% für die Dokumentation. Nur 53% Prozent der Zeit wird wirklich direkt am Bauteil gearbeitet. Die Dokumentationszeit kann laut Autoren komplett auf null durch Einführung automatisierter, digitaler Tools verringert werden, da mithilfe dieser die Dokumentation parallel zu den jeweiligen Arbeitsschritten durchgeführt werden kann. Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der Gesamtzeit ist eine Verbesserung der internen Prozessplanung durch eine Einführung einer digitalen Datenbank mit historischen Schäden und den dazugehörigen Planungen und Zertifizierungen, um so die Arbeitsstunden und Materialien besser abschätzen zu können und so Wartezeiten zu verringern. So könnte die Gesamtdauer um weitere 14% verringert werden.

4 Virtual Reality

4.1 Definition und Einordnung

Wird im Industriesektor von Innovation gesprochen, fällt oft auch der Begriff Virtual Reality. Die fortschreitende Digitalisierung von Prozessen und die damit einhergehende Vermischung von physischen und digitalen Aspekten bei einigen Prozessen bringt auch eine veränderte Interaktion zwischen Menschen (z.B. Werker) und physischen Produkten mit sich. Hierfür werden geeignete Schnittstellen zwischen Mensch und der digitalen Welt benötigt, um Brücken zwischen den digitalen und physischen Aspekten zu schlagen [28]. Als Alternative zur klassischen Desktop-PC Benutzerschnittstelle, die vor allem mit rein digitalen Informationen arbeitet, hat die virtuelle Realität an Bedeutung in industriellen Prozessen gewonnen. Im folgenden wird diese Technologie vorgestellt.

Virtual Reality (VR) ist ein Teil der Mixed Reality (MR), die auch noch die Augmented Reality (AR) und die Augmented Virtuality (AV) beinhaltet [29]. Auf die genannten Begriffe wird später noch genauer eingegangen. Die Einordnungen in verschiedene Begriffe variiert je nach Literatur stark. So wird zum Beispiel Mixed Reality auch Extended Reality (XR) genannt. Rauschnabel et al. [30] haben diese unterschiedlichen Einordnungen untersucht und zusammengestellt. Ein Überblick ist in Abbildung 4.1 zu sehen. In diesem Kapitel wird im Wesentlichen die Einordnung nach Milgram et al. [31] genutzt (in Abbildung 4.1 "MR-dominant view").

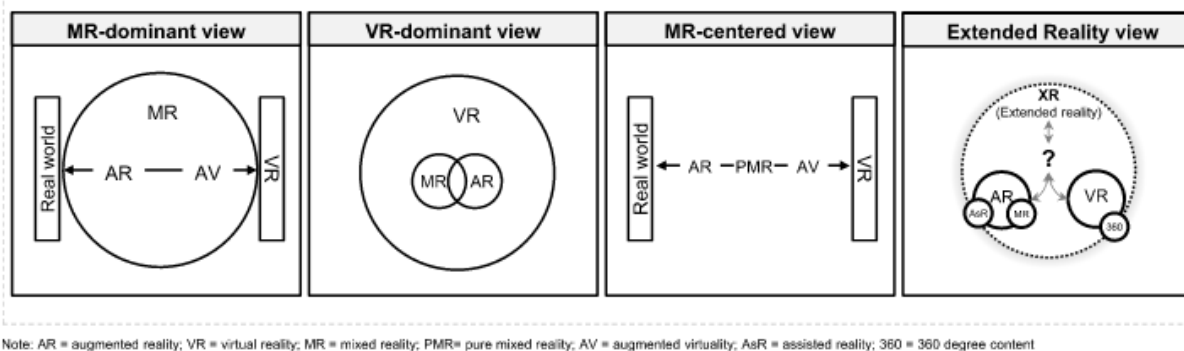


Abbildung 4.1: Schematische Einordnung von Reality-Formaten [30]

Grundlage der Einordnung nach Milgram et al. [31] ist das Reality-Virtuality Kontinuum (im Folgenden RVK genannt), welches in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Es erstreckt sich zwischen Realität und Virtualität, wobei die realen Anteile kontinuierlich abnehmen. Innerhalb dieses Kontinuums befinden sich die verschiedenen Realitätformate. Überwiegt der Anteil der realen Welt wird von Augmented Reality gesprochen, wenn der virtuelle Anteil überwiegt, dann von Augmented Virtuality. Virtual Reality Technologien erzeugen eine möglichst komplett virtuelle Umgebung, wodurch sie an der virtuellen Grenze des Kontinuums einzuordnen sind [29]. Im Folgenden werden diese Formate erklärt:

Bei der **Augmented Reality** wird eine reale Umgebung mithilfe von geeigneter Soft- und Hardware um virtuelle Inhalte erweitert [29]. Abbildung 4.3 zeigt ein Screenshot der App Pokémon GO, ein Videospiel für Smartphones, bei dem sich interagierbare Spielfiguren mithilfe von Augmented Reality in die reale Umgebung einfügen. Die **Augmented Virtuality** ist ein weiterer Schritt in Richtung virtuelle Welt. Anders als bei der Pokémon GO App würde hier zum

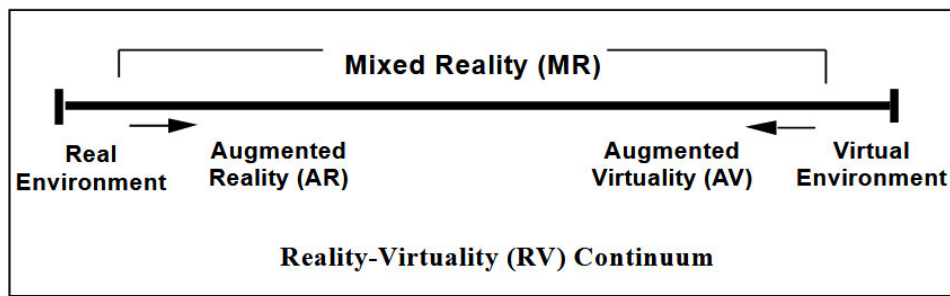


Abbildung 4.2: Reality-Virtuality Kontinuum [31]

Beispiel über die Kamera ein reales Tier in einer virtuellen Umgebung auf dem Display ausgegeben werden, der virtuelle Anteil überwiegt also [32].

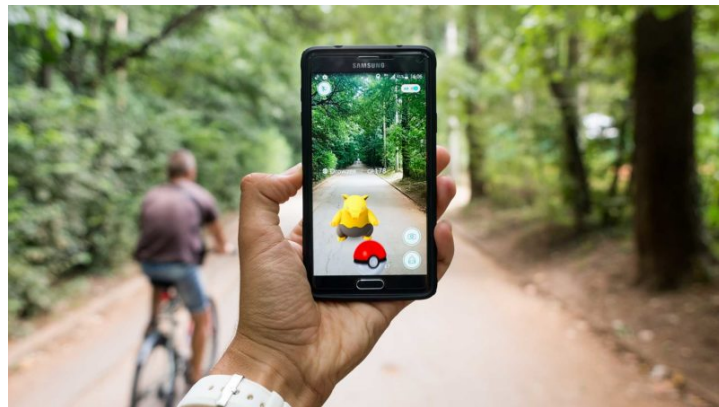


Abbildung 4.3: Augmented Reality in der Pokémon GO App [33]

Bei der **Virtual Reality** hingegen befindet der Nutzer sich in einer möglichst immersiven Welt. Immersion beschreibt im Kontext von MR ein Maß, das aussagt, wie weit ein technisches System den Nutzer über seine Sinne in eine virtuelle Welt eintauchen lässt. Je größer die Immersion, desto mehr verdrängt der Nutzer die reale Welt zugunsten der virtuellen [34]. Der Nutzer befindet sich also, anders als bei der AR, in einer von realen Einflüsse abgeschotteten Umgebung und interagiert mit dieser. Eine Veranschaulichung der Unterschiede zwischen AR und VR ist in Abbildung 4.4 zu sehen.

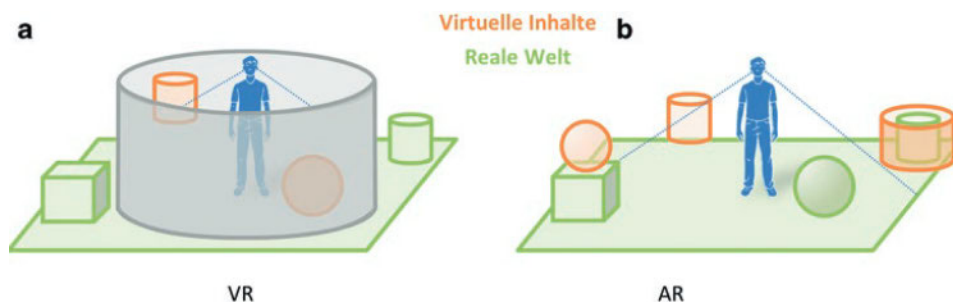


Abbildung 4.4: Vergleich AR und VR [29]

Um möglichst viel Immersion beim Nutzer zu erzeugen, spielt die passende Hard- und Software eine essentielle Rolle. Im Gegensatz zur AR, die ,wie oben beschrieben, auch mithilfe

von Smartphones oder Tablets angewendet werden kann, benötigt die VR ein System, welches den Nutzer umschließt. Bei den ersten Flugsimulatoren wurde virtuelle Realität durch eine Kamera erzeugt, die über eine Modelllandschaft bewegt wird, je nach dem wie der Flugschüler das virtuelle Flugzeug bewegt. Das Bild der Kamera wurde dann im Simulator auf einem Bildschirm angezeigt. Moderne VR-Systeme nutzen jedoch computerbasierte Modellierungen zur Erzeugung von Immersion [29]. Jedoch ist der Grundaufbau von VR-Systemen gleich geblieben, welcher anhand des Beispiels vom Flugsimulator wie folgt eingeteilt werden kann:

Der Flugschüler bestimmt die gewünschte Bewegung des virtuellen Flugzeuges zum Beispiel mithilfe des Steuerhorns, also einer Eingabe. Die Bewegung des Steuerhorns, also die Eingabe, muss nun von einem System in die daraus resultierende Bewegung des Flugzeuges bzw. der Kamera umgerechnet werden. Das Bild der Kamera wird auf dem Bildschirm angezeigt, also ausgegeben. Das System kann also in drei Komponentenbereiche eingeteilt werden: Eingabegeräte, Ausgabegeräte sowie ein Computersystem, welches die Weltsimulation übernimmt. Ein Überblick über die Komponenten eines VR-Systems kann in Abbildung 4.5 gesehen werden. Auf die einzelnen Teilsysteme wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

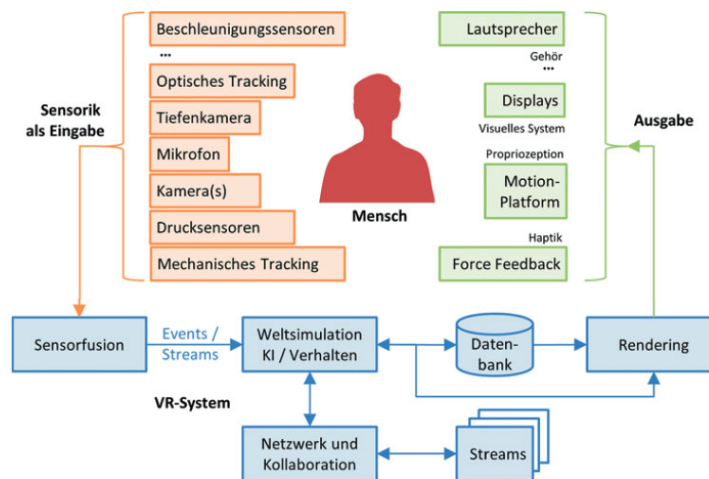


Abbildung 4.5: VR-System [29]

4.2 VR-Systemkomponenten

4.2.1 Ausgabegeräte

In modernen VR-Systemen ist meist ein Head-Mounted Display (HMD) die zentrale Ausgabekomponente, also Brillen mit Bildschirmen, die jeweils direkt vor dem Auge getragen werden (siehe Abbildung 4.6). Dadurch entsteht ein stereoskopisches dreidimensionales Bild. Die verschiedenen HMDs unterteilen sich in die Kategorien Standalone HMDs, also kabellose, und PC-gebundene HMDs. Der Vorteil der Standalone Geräte ist die freiere Mobilität. Aufgrund der hohen grafischen Anforderungen an eine virtuelle Umgebung, wird eine hohe Rechenleistung benötigt. Da diese bei den Standalone Geräten mit in der Brille verbaut sein muss und daher was Platz, Gewicht und Lautstärke angeht begrenzt ist, fällt diese oft schwächer aus als bei einem PC-gebundenen Headset, welches die Grafikkarte des PCs nutzt. Dadurch kann die Komplexität der virtuellen Umgebung auf Standalone Geräten nur eingeschränkt dargestellt werden [35]. Unter Anderem folgende Faktoren bestimmen das Maß an Immersion, dass durch ein bestimmtes HMD erreicht werden kann:

- Da die Augen sich in unmittelbarer Nähe zu den Displays befinden, sind sehr **hohe Auflösungen** der Displays nötig, damit der Nutzer nicht das Pixelraster sieht [29].
- Eine **Bildwiederholungsrate** von mindestens 90 Hertz verhindert unflüssige Darstellungen von Bewegung und Motion Sickness, also ein Schwindelgefühl, welches aufkommt wenn das Gehirn über die Augen Bewegungen wahrnimmt, diese jedoch nicht über den Gleichgewichtssinn spürt [36].
- Das reale **Sichtfeld (Field of View, FOV)** eines Menschen beträgt mehr als 180° horizontal, während aktuelle VR-Systeme üblicherweise zwischen 90°-120° anzeigen können, Tendenz steigend. Durch größere FOVs hat der Nutzer ein verstärktes Präsenzgefühl sowie ein geringeres Risiko für Motion-Sickness [37].
- Die **Latenz**, also die Zeit zwischen einer Bewegung und der Anzeige dieser Bewegung auf dem Bildschirm, sollte unter 20 Millisekunden liegen [38].

Neben den HMDs gehören auch akkustische Geräte wie Kopfhörer oder Lautsprecher zu den typischen Ausgabegeräten. Über diese wird die räumliche Orientierung des Nutzers und die zeitliche Zuordnung von Ereignissen unterstützt [29].

Außerdem gibt es noch haptische Ausgabegeräte, die verschiedene Reize, Vibrationen oder Anwendung von Kraft spürbar machen kann. Diese Funktionen sind meist in Eingabegeräten, wie zum Beispiel Controllern, integriert. Ein zu nennendes Beispiel sind haptische VR-Handschuhe wie der SenseGlove Nova 2, zu sehen in Abbildung 4.7, der sowohl als Eingabe-, als auch als Ausgabegerät dient. Über das Seilzugsystem können Kräfte aufgebracht werden, sodass dem Nutzer zum Beispiel das Gefühl, virtuelle Gegenstände in der Hand zu halten, übermittelt werden kann.



Abbildung 4.6: Nutzer mit HTC VIVE Pro HMD und Controllern [39]



Abbildung 4.7: VR-Handschuh SenseGlove Nova 2 [40]

Zuletzt gibt es noch stationäre VR-Systeme. Diese können aus einzelnen Bildschirmen bestehen, was jedoch eine sehr geringe Immersion auslöst, oder aus Bildschirmen, die den Nutzer umschließen. Dies kann durch eine würfelförmige Anordnung der Displays geschehen, bei der der Nutzer dann von allen Seiten von Displays umgeben ist, oder mit sphärischen Displays,

also gebogene Bildschirme, die den Nutzer in verschiedenen Graden umschließen [29]. Ein Beispiel hierfür ist die 2023 fertiggestellte Sphere in Las Vegas, ein kugelförmiges Gebäude, welches im Inneren auf einer Fläche von 15.000 Quadratmetern mit LEDs einen Bildschirm erzeugt, der den Besuchern das Gefühl gibt, „im Bild“ zu sein. Auch haptische Ausgabegeräte, die zum Beispiel spürbaren Wind erzeugen, und akustische in Form von ca. 160.000 einzeln angesteuerten Lautsprechern [41].

4.2.2 Eingabegeräte

Damit der Nutzer mit der Welt interagieren kann, werden Eingabegeräte sowie Trackingverfahren benötigt. Die wichtigste Funktion der Eingabegeräte ist das Tracking, also der kontinuierlichen Bestimmung der Position von etwas. Um sich in der virtuellen Welt bewegen zu können, muss das Weltsimulationssystem wissen, wo man ist und wo man hinsieht. Wenn man mit einem virtuellen Objekt zum Beispiel mit der Hand interagieren will, muss es wissen, wo sich die Hand befindet. Hierfür werden verschiedene Trackingverfahren genutzt, die generell in zwei Kategorien unterteilt werden können: Verfahren, bei denen sich die messenden Sensoren direkt an dem Objekt befinden, dessen Position bestimmt wird (Inside-Out-Tracking), und Verfahren, bei denen die messenden Sensoren in der Umgebung sind und so ein bestimmtes Objekt verfolgen (Outside-In-Tracking) [29]. Des Weiteren gibt es verschiedene technische Ansätze für Trackingverfahren, von denen das Lasertracking und das optische Tracking mithilfe von Kameras im Folgenden genauer vorgestellt werden:

- Das **Lasertracking** gehört zu den Outside-In-Trackingverfahren und nutzt in der Regel mehrere Basen in der Umgebung, die rotierende Laserstrahlen aussenden. Auf den zu verfolgenden Objekten befinden sich mehrere Photosensoren, sodass die Position und Rotation des Objektes über die Zeitdifferenz zwischen dem Start einer Rotation des Lasers und dem Auftreffen des Lasers auf einem Photosensor ermittelt werden kann. Die Synchronisation zwischen den Basen und Photosensoren erfolgt entweder über den Laserstrahl selbst oder über zusätzliche Infrarotsignale [29] [42] [43]. Ein Beispiel für ein VR-System, welches diese Form des Trackings verwendet, ist das, in diesem Projekt verwendete, HTC Vive Pro System mit HMD, Basestationen und Controllern, welches in Abbildung 4.6 zu sehen ist. Hier können auch über das Gehäuse verteilt kleine Einbuchtungen, die Photosensoren, gesehen werden.
- Das **optische Tracking**, auch kamerabasiertes Tracking genannt, ist ein Überbegriff für unterschiedliche Arten des Trackings. Die Grundidee ist hierbei, mithilfe von Objekten, welche im Videostrom der Kamera auftauchen, die Position der Kamera gegenüber den Objekten zu bestimmen [44]. Hierfür werden bei einigen Verfahren sogenannte Marker, also für die Kamera gut erkennbare Objekte, eingesetzt, andere kommen ohne aus. Beim markerlosen Tracking werden zum Beispiel geometrische Formen wie Kanten und Ecken kontinuierlich aus dem Kamerabild aufgenommen und so anhand der Abstände von geometrischen Formen zu ihrer Position aus dem vorherigen Bild die neue Position des verfolgten Objekts bestimmt. Optisches Tracking kann sowohl mit einer Kamera am zu verfolgenden Objekt selbst, als auch mit Kameras in der Umgebung durchgeführt werden, also sowohl als Inside-Out-, als auch als Outside-In-Trackingsystem, genutzt werden. Aufgrund der hohen Genauigkeit sowie bei Inside-Out-Verfahren der Flexibilität, setzt sich optisches Tracking immer mehr durch, oft in Kombination mit anderen Trackingverfahren. Ein Nachteil ist die Empfindlichkeit gegenüber verschiedenen Lichtsituationen [29] [43].

Bei vielen VR-Systemen wird die Position des Nutzers ermittelt, indem das HMD getrackt wird. Dieses dient also, wie in Abschnitt 4.2.1 bereits kurz am Beispiel des haptischen VR-Handschuhs erwähnt, sowohl als Eingabe-, als auch als Ausgabegerät. Gleiches gilt auch für Controller, die neben den Eingabeknöpfen auch haptische Reize wie Vibrationen ausgeben. Diese zählen zu den Standardeingabegeräten und sind Teil fast aller gängigen VR-Systeme. Mit ihnen können Interaktionen, wie zum Beispiel das Greifen von virtuellen Objekten, nachgestellt werden, jedoch ist dies eine eher schlechte Abbildung realer Interaktionen eines Menschen mit einem Objekt. Das kann mithilfe des Finger-Trackings umgangen werden, bei dem Eingabegeräte mehr an die natürlichen Bewegungen des Menschen angepasst werden [45] [46]. Ein Beispiel hierfür ist der in Abbildung 4.7 zu sehende SenseGlove Nova 2.

Weitere Eingabegeräte sind sehr vielseitig und reichen von Datenanzügen fürs Ganzkörpertracking (siehe Abbildung 4.8), die prinzipiell wie VR-Handschuhe funktionieren, hin zu Fortbewegungseingabegeräten (Locomotion Devices), wie zum Beispiel omnidirektionale Laufbänder [47] (siehe Abbildung 4.9).



Abbildung 4.8: Haptischer Ganzkörperanzug Teslasuit (Ein- und Ausgabegerät) [48]

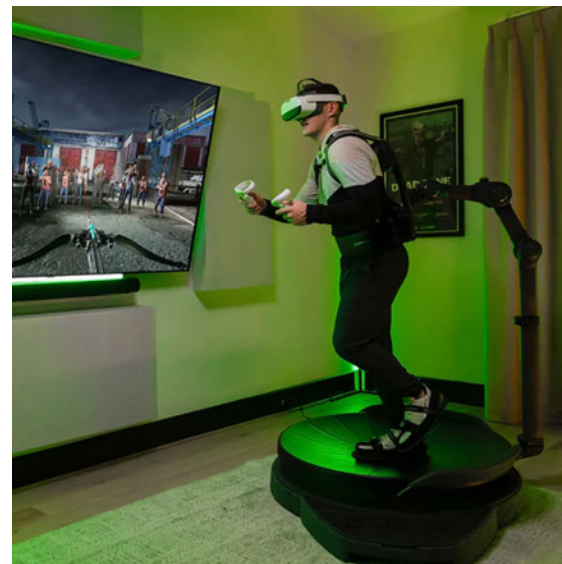


Abbildung 4.9: Omnidirektionales Laufband Omni One der Firma Virtuix [49]

4.3 Nutzung von VR

Neben dem privaten Gebrauch vor allem für Entertainment-Zwecke wird VR auch in industriellen und Wirtschaftssektoren sowie in der Bildung und vielen anderen Bereichen genutzt. Im Folgenden werden die Zwecke der Nutzung erklärt sowie Beispiele gebracht.

Viele Anwendungsfälle befinden sich im Bereich der Aus- bzw. Weiterbildung, also der Informationsvermittlung mithilfe von VR. VR bietet die Möglichkeit in Inhalte „einzutauchen“, was die Distanz zwischen den Inhalten und den Rezipienten verringern kann [50]. Mehreren Studien zufolge erhöht das Lernen mit VR die Lern- und Gedächtnisleistung sowie die Motivation [5] [6] [7], wodurch Lernprozesse effizienter werden. Außerdem setzen viele gängige Ausbildungsmodelle auf sogenanntes training-on-the-job [50], was bedeutet, dass ein Auszubildender in der Lernphase von einem Tutor betreut wird, wodurch viel Personal zur Ausbildung benötigt wird. Viele Unternehmen nutzen daher bereits VR für Ausbildungszwecke. Vor allem in

sicherheitskritischen Bereichen wie der Luftfahrtbranche zeigen sich die Vorteile der Nutzung von VR. So testen Airbus und Lufthansa Aviation Training sowie viele Fluggesellschaften eine VR-Anwendung zur Ausbildung von Piloten. Neben normalen Flugsituationen können hier auch Notfallsituationen wie Abstürze trainiert werden, ohne dass dabei sehr teure Simulatoren benötigt werden. In Zukunft können so, wenn die nötige Hardware vorhanden ist, Ausbildungsabschnitte theoretisch sogar von zu Hause aus erlernt werden. [51] [52]. Auch für die Aus- und Weiterbildung des Kabinenpersonals setzt Lufthansa Aviation Training vermehrt auf VR [53]. Die NASA nutzt VR, um Außenbordeinsätze und spezifische Missionen zu trainieren. Im NASA Virtual Training Lab können so zum Beispiel das Zusammenspiel von Mensch und Roboter zur Applikationen von Komponenten außen an Raumstationen geübt werden. Besonderheiten sind hier, dass mithilfe verschiedener Ausgabegeräte auch Schwerelosigkeit und vor allem der Umgang mit Objekten in schwerelosen Umgebungen simuliert werden können [54] [55]. Auch bei Bodenoperationen an Flughäfen kommt VR zum Einsatz. So hat die IATA, ein Dachverband für Fluggesellschaften, eine VR Anwendung entwickelt, mit der diese trainiert werden können. Normalerweise finden solche Trainings auf dem Vorfeld statt, wo viel Betrieb herrscht, was Gefahren und Risiken vor allem für Einsteiger mit sich bringt. Außerdem muss das Training teilweise unterbrochen werden, damit der Betrieb nicht gestört wird. VR bietet hier eine sichere und einsteigerfreundlichere Umgebung, bei der sich der Nutzer voll und ganz auf seine zu trainierende Aufgabe konzentrieren kann. Laut eigenen Angaben der IATA kann so die Trainingszeit um 25% reduziert werden. Einer am Flughafen Frankfurt durchgeführten Fallstudie zufolge können sich die Teilnehmer Informationen viermal so gut merken, als ohne VR [56]. Auch im Bereich MRO wird zu Trainingszwecken VR eingesetzt. Die Anzahl an Menschen, die Ausbildungen im MRO Bereich abschließen, ist um 30% gesunken, während Vardomatski [57] zufolge jährlich 12.000 neue Flugzeugmechaniker eingestellt werden müssen, um den Bedarf zu decken. Grund für den Rückgang kann unter Anderem durchaus die hürdenreiche Ausbildung sein, da, wie in Abschnitt 2.2 erklärt, diese von den zuständigen Behörden lizenziert werden muss. Mithilfe von VR können Ausbildungszeiten potentiell stark verkürzt werden [57]. Da Zeit bei MRO-Prozessen ein wichtiger Faktor ist, um Ausfallzeiten des Flugzeugs zu verringern, müssen Arbeitsschritte unter Zeitdruck durchgeführt werden, was das Erlernen dieser Arbeitsschritte erschwert. Flugzeugkomponenten und -systeme, die nur zu Ausbildungszwecken bereitgestellt werden, benötigen Platz, sind teuer und Arbeitsschritte sind nicht immer beliebig oft wiederholbar. Mithilfe von VR können Auszubildende verschiedene Wartungsabläufe beliebig oft wiederholen und sich so Routinen aneignen. Es besteht kein Risiko, teure Flugzeugkomponenten zu beschädigen oder sich selbst durch fehlende Erfahrung mit zum Beispiel schweren Bauteilen zu verletzen [58].

Neben der Nutzung zu Trainingszwecken, wird VR auch vermehrt für individuelle Designkonfigurationen von zum Beispiel Einrichtungsgegenständen genutzt. Vorteil ist, dass Designs kostengünstig erst virtuell erstellt und dem Kunden gezeigt werden können, ohne ein physischen Prototyp fertigen zu müssen, und dieser so einen sehr guten Eindruck erlangen kann, wie das Produkt am Ende wirklich aussieht. Airbus nutzt beispielsweise VR, um in Zusammenarbeit mit den Flugzeugbetreibern die Kabine einzurichten [59].

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Visualisierung von Versuchsdaten, um diese besser zu verstehen. So wird zum Beispiel die Umströmung eines Flugzeuges oder eines Fahrzeugs mithilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) berechnet und visuell dargestellt. Die Ergebnisse einer solchen Analyse können an einem virtuellen Flugzeug in VR dargestellt werden. Aber auch sehr abstrakte Daten können auf kreative Art und Weise in VR dargestellt werden.

So könnte man zum Beispiel Analysten in Finanzdaten „eintauchen“ lassen [29].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass VR in verschiedensten Bereichen Prozesse verbessern kann und sich daher weitere Entwicklungen und Verbesserungen dieser Technologie durchaus lohnen. Durch VR kann schlecht verfügbares, hoch qualifiziertes Personal entlastet und in vielen Fällen Zeit eingespart werden. Herausforderungen sind die aufwändige Inhaltserstellung sowie die technische Komplexität von VR-Systemen vor allem im Bezug auf Kompatibilität zwischen verschiedenen Systemen, die geschultes Personal erfordern [58].

5 Problemvisualisierung mittels Virtual Reality

In Abschnitt 3 wurden Probleme des Reparaturprozesses von Winglets beschrieben. Da der Prozessablauf sehr unübersichtlich ist, sollten in diesem Projekt ineffiziente Stellen des Prozesses visualisiert werden, um diese vor allem Nutzern näher zu bringen, die sich nicht mit diesem Prozess beschäftigt haben. Hierfür wurde eine VR-Anwendung erstellt, in der der Reparaturprozess eines Winglets nach Aigner et al. [2] stark vereinfacht dargestellt wird. Ziel dieser Anwendung ist nicht, eine realistische Anleitung für die Reparatur zu bieten, sondern in spielerischer Art und Weise die Einflussfaktoren, die die Effizienz verschlechtern, darzustellen. Im folgenden Kapitel wird der Ablauf der Erstellung der VR-Anwendung erklärt, sowie Schwierigkeiten und Lösungen präsentiert.

5.1 Konzeptioneller Ansatz und Ablauf

Die grundlegende Idee dieser Anwendung basiert auf der, in Abschnitt 4.3 erwähnten, verbesserten Lern- und Aufnahmefähigkeit durch die Nutzung von VR. Durch eine aktive Erfahrung sollen die Einflussfaktoren auf die Effizienz des Prozesses eindrücklich und vor allem schnell vermittelt werden. Hierfür muss ein möglichst großer Ausschnitt aus dem Prozess dargestellt werden, der jedoch stark vereinfacht werden muss, um den Nutzer nicht mit Informationen und Eindrücken zu überladen. Es werden also viele Schritte im Prozess übersprungen und der Nutzer schlüpft auch in die Rolle verschiedener Akteure, um möglichst viel darstellen zu können. Außerdem musste sich vor allem auf die Darstellung von Einflussfaktoren beschränkt werden, die auch gut visualisierbar sind. So ist die Wartezeit auf die Lieferung von Bauteilen und Arbeitsschrittplanung zwar nach Aigner et al. [2] der größte zeitliche Faktor, jedoch kann dieser nur schwer dargestellt werden. Aufgrund dessen wurden im Wesentlichen folgende zwei Einflussfaktoren dargestellt:

- Die vielen, nicht vereinheitlichten Dokumentationsformen während des Prozesses. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, beinhalten alle MRO-Prozesse im Luftfahrtbereich sehr umfangreiche Dokumentationen, welche in dem darzustellenden Reparaturprozess sowohl teilweise digital, als auch klassisch in Papierform durchgeführt werden und somit oft nicht kompatibel miteinander sind [2]. Die Darstellung soll durch virtuelle Dokumentenformate in der VR Umgebung erfolgen, wobei die der reale Inhalt der verschiedenen Dokumente nicht öffentlich zugänglich ist und daher nur vereinfachter Beispieldinhalt gezeigt werden soll.
- An dem Prozess sind bei jedem Prozessschritt viele verschiedene Akteure beteiligt, so dass viele Rücksprachen gehalten werden müssen. Zudem muss nach jedem Prozessschritt auch eine Übergabe an die Akteure des nächsten Prozessschrittes erfolgen. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der anderen Akteure, die auch noch anderweitig beschäftigt sind, kann es so zu Verzögerungen kommen, zum Beispiel weil diese gesucht werden müssen. Dieser Faktor soll vereinfacht dargestellt werden, indem der Nutzer in der virtuellen Umgebung anderen Menschen hinterherlaufen muss, um eine Interaktion zu starten. Dies soll an die reale Situation angelehnt sein, in der eine Person „abgefangen“ wird, da sie sich nicht immer im Büro aufhält.

Anschließend wurde ein Prozessabschnitt ausgewählt, der möglichst viel dieser beiden Einflussfaktoren enthält, aber auch möglichst viel des gesamten Prozesses abbildet. In der von Aigner et al. [2] erarbeiteten Prozesskette (Abbildung 3.3 wurden vor allem Elemente aus den Prozessschritten Inspektion und Reparatur entnommen und zusammengefügt. Der Prozessschritt

der Quotation, also die Planung der Arbeitszeit und -zuteilung sowie die Materialbestellung, liegt zwischen diesen beiden Schritten. Dieser nimmt zwar sehr viel Zeit in Anspruch, da er jedoch schlecht visuell darstellbar ist, wurde er nur am Rande in der Anwendung erwähnt. Vor und nach den erwähnten Prozessschritten wurden noch ein paar kleine Elemente hinzugefügt, um den zu durchlaufenden Ausschnitt besser in den Gesamtprozess einzubetten. Der daraus entstandene fiktive Prozess, der in der VR-Anwendung durchlaufen wird, besteht aus folgenden Aufgaben:

1. Das beschädigte Winglet abmontieren und auf der Werkbank platzieren
2. Den Schaden des Winglets mithilfe eines Tablet-Computers fotografieren, in den Damage Report einfügen und diesen anschließend nach Absprache mit dem Engineering losschicken
3. Anhand des Reparaturauftrages das Winglet reparieren und die Reparatur darin dokumentieren
4. Einen NDT in Auftrag geben
5. Die Dokumentation der Reparatur abschließen, den Reparaturauftrag stempeln und einheften
6. Repariertes Winglet wieder an das Flugzeug anbringen

Die Umgebung, in der die Aufgaben abgearbeitet werden sollen, soll dabei möglichst an eine reale MRO Umgebung erinnern, weshalb ein Flugzeughangar gewählt wurde.

5.2 Verwendete Hard- und Software

Wie in Abschnitt 4 beschrieben, wird zur Erstellung und Nutzung von VR-Anwendungen ein VR System benötigt, welches aus verschiedenen Hard- und Softwarekomponenten besteht. Es existiert bereits eine breite Auswahl an Herstellern und Systemen für die verschiedenen Komponenten. Im folgenden Kapitel wird die für dieses Projekt verwendete Hard- und Software kurz vorgestellt.

5.2.1 Blender

Zur Erstellung und Texturierung von 3D Grafiken wurde die Software Blender (Version 4.3), koordiniert durch die Blender Foundation, genutzt. Mit der Software können auch Animationen von 3D-Modellen vorgenommen werden. Es ist eine Open Source Software, der Quellcode kann also von allen Nutzern frei eingesehen und verändert werden. Das hat neben der Gebührenfreiheit den Vorteil, dass sich eine große Nutzerschaft entwickelt hat, die sehr viele kostenfreie Dokumentationen, Tutorials und Asset Libraries zur Verfügung stellen, wie sonst nur bei teuren alternativen Softwares.

5.2.2 Godot

Um 3D-Modelle zu einer VR-Umgebung zusammenzufügen, die auch physikalische Eigenschaften der realen Welt aufweist (z.B. Schwerkraft) sowie Interaktionen bietet, wird eine Game Engine benötigt. Hier wurde sich für die Godot Engine entschieden, auch eine Open Source

Software. Die bei den Ausführungen zu Blender erwähnten Vorteile von Open Source Software, wie die sehr gute Dokumentation, gelten hier auch. Weitere Vorteile bieten seit dem Release von Godot 4.x vor allem das Unterstützungssystem für Virtual- und Augmented Reality, welches die Implementierung von VR-Funktionen stark vereinfacht. Über ein Plugin (SteamVR von Valve Corporation) wird eine stabile Verbindung zwischen Entwicklungsumgebung und VR-Hardware bereitgestellt, das auch über die Nutzung des Industriestandards OpenXR der Khronos Group ermöglicht, dass eine Anwendung für verschiedene VR-Hardware gleichzeitig implementiert werden kann. Es wurden bereits auch viele kostenlose VR-Assets von der Community erstellt, wie zum Beispiel die Godot XR Tools, die grundlegende Funktionen für Bewegungen oder interaktive Objekte und einiges mehr bereit stellen [60]. Ein weiterer Vorteil ist die Schlankheit und Effizienz der Software, wodurch diese sehr schnell gestartet werden kann und auch auf weniger starker Hardware funktioniert [61]. Godot arbeitet, ähnlich wie viele CAD-Programme, mit einem Knotensystem (Nodes), die in Parent/Child Beziehung zueinander stehen. Jeder Knoten basiert auf einem sogenannten Node3D und ist im Prinzip ein Baustein, der je nach Knotentyp verschiedene Funktionen bereitstellen kann.

In Godot wird eine eigene Skriptsprache genutzt, die GDScript heißt und syntaktisch an Python angelehnt ist. Es kann aber auch in C# und C++ programmiert werden. In diesem Projekt wurde sich jedoch für GDScript entschieden, da dafür die Dokumentation umfangreicher ist [62]. Nachteil im Vergleich zu anderen führenden Game Engines (z.B. Unity von Unity Software Inc. und UnrealEngine von Epic Games Inc.) ist vor allem die begrenzte 3D-Leistungsfähigkeit [61]. Das kann vor allem in VR-Anwendungen, in denen eine sehr hohe Immersion gewollt ist, zu Problemen führen. Godot eignet sich also im 3D Bereich vor allem für Prototypen und kleine Anwendungen.

5.2.3 HTC Vive Pro

Zur Erstellung der Anwendung wurde das HTC Vive Pro System genutzt (siehe Abbildung 4.6), welches von den Firmen HTC Corporation und Valve Corporation entwickelt wurde. Das System beinhaltet ein laserbasiertes Trackingsystem, welches Basisstationen nutzt, von denen minimal zwei verwendet werden müssen, damit der Nutzer nicht mit seinem Körper die Laserstrahlen verdecken kann. Mit zwei Basisstationen kann eine Fläche von $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, mit vier Basisstationen $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ genutzt werden [63]. Das Headset hat keine eigene Grafikkarte verbaut und benötigt deshalb eine Verbindung zu einem PC. Diese Verbindung ist mit einem Kabel realisiert, was Nachteile in der Bewegungsfreiheit mit sich bringt. Vorteil der dauerhaften Kabelverbindung ist, dass während der Erstellung der VR-Umgebung und Interaktionslogiken in Godot die Anwendung sehr schnell im Debug-Modus gestartet werden kann, um zum Beispiel die Skalierung neu eingefügter 3D-Modelle zu überprüfen. Bei Standalone-Headsets muss die Anwendung jedes mal in eine ausführbare Datei für das jeweilige Betriebssystem (oft Android von Google) exportiert werden, was vor allem in der Entwicklung, wo oft Kleinigkeiten überprüft werden müssen, sehr zeitaufwändig ist. Generell ist das Nutzen der fertigen Anwendung aber mit allen gängigen VR-Systemen möglich, die OpenXR-Runtimes unterstützen.

5.3 Umsetzung

Wie in Abschnitt 5.1 erwähnt, soll die Umgebung der Anwendung ein Flugzeughangar sein, in dem auch das beschädigte Flugzeug als Ganzes steht. Hierfür wurden die 3D-Modelle des Hangars und des Flugzeuges aufbereitet und mit Texturen versehen. Damit das beschädigte Winglet für den Nutzer erreichbar ist, wurde eine Treppe mit einer Plattform in Blender er-

stellt. Die Menschen, mit denen Interaktionen stattfinden sollen, bewegen sich über den gesamten Zeitraum auf einer vorgegebenen Bahn durch den Hangar, um diesen etwas mit Leben zu füllen. Des Weiteren wurde ein Panoramabild von einem Himmel kugelförmig um den gesamten Hangar (Skybox) gelegt, damit der Himmel durch die Fenster sichtbar ist. Ein Blick auf einige der Elemente der VR-Umgebung ist in Abbildung 5.1 zu sehen. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Aspekte der VR-Anwendung erklärt.



Abbildung 5.1: VR-Umgebung

5.3.1 Movement und Funktionen (XRTools)

Um sich in der VR-Anwendung fortzubewegen, kann der Nutzer im realen Raum herumlaufen. Da der Hangar jedoch sehr groß ist und selten so große reale Flächen vorhanden sind, dass der Nutzer sich so durch den ganzen Hangar bewegen könnte, müssen für die Fortbewegung Funktionen, wie zum Beispiel eine Teleportfunktion, erstellt werden. Wie in Abschnitt 5.2.2 erwähnt, bieten hier die Godot XRTools, erstellt von Bastiaan Olij, Malcom Nixon und vielen anderen, bereits erstellte Funktionen an. Diese wurden auch für andere Funktionen, wie zum Beispiel das Greifen von Objekten, genutzt. Eine Übersicht der genutzten Funktionen ist in Tabelle 5.1 zu sehen.

Neben den Bewegungsfunktionen sind vor allem die Funktionen hervorzuheben, die zum Greifen von Gegenständen genutzt werden, da sie in großem Umfang für die Anwendung genutzt wurden. So wurde der Pickable-Baustein als Parent-Knoten aller greifbarer Gegenstände genutzt.

Tabelle 5.1: Genutzte XRTools

Bezeichnung	Erklärung
XROrigin3D	Initialisierung von Kamera (Sichtfeld), Spielerhöhe...
XRController3D	Initialisierung der Controller
FunctionTeleport	Teleportieren
FunctionLaserpointer	Laserpointer zur Interaktion mit z.B. UIs
FunctionCrouch	Bücken
FunctionPickup	mit den Händen Gegenstände greifen
Pickable	Gegenstand, der gegriffen werden kann
HighlightVisible	Aufleuchten eines Gegenstandes, wenn dieser in greifnähe ist
SnapZone	„Halterung“ von Pickable
Viewport2Din3D	Viewport für UIs in VR, der Interaktionen mit Laserpointer möglich macht
Hands	3D-Handmodelle mit verschiedenen Posen
GrabPoints	Festlegung der Punkte, an denen ein Gegenstand gegriffen wird und der Pose, die die Hand beim greifen einnimmt

5.3.2 Navigation

Damit der Nutzer zu jeder Zeit weiß, was zu tun ist, wird eine Navigation durch die Anwendung benötigt. Hierfür wurde dem Kamera-Knoten, der das Sichtfeld des Nutzers festlegt, ein Viewport2Din3D (siehe Tabelle 5.1) hinzugefügt, welcher sich somit immer im Sichtfeld des Nutzers befindet. Dieser wird mit verschiedenen User Interfaces (UI) bestückt, die dann nacheinander sichtbar gemacht werden. Der Viewport mit der Begrüßungs-UI kann in Abbildung 5.2 gesehen werden.



Abbildung 5.2: Navigations-Viewport mit Begrüßungs-UI

Der Wechsel von einem User Interface zum nächsten erfolgt durch Drücken eines „Weiter“-Buttons auf dem aktuellen UI, wodurch dieser Button ein Signal aussendet, durch das eine Funktion aufgerufen wird. In dieser Funktion wird dann das aktuelle UI unsichtbar gemacht und das darauf folgende sichtbar. In Abbildung 5.3 kann die Funktion gesehen werden, die aufgerufen wird, wenn der Button des zweiten UIs gedrückt wird. Die verschiedenen „slides“ sind die UIs. Wenn alle UIs zur Erklärung eines Arbeitsschrittes durchlaufen wurden, wird der gesamte Viewport unsichtbar gemacht und deaktiviert. Nach dem Abschluss eines Arbeitsschrittes wird dieser wieder sichtbar gemacht. Hierfür wurde eine globale Funktion erstellt, die, anders als die lokalen Funktionen, in jedem Skript aufgerufen werden kann. Die Funktion und ein Beispiel, wie sie aufgerufen wird (hier nach Ablauf eines Timers) sind in Abbildung 5.4 zu sehen.

```
26 func _on_button_2_pressed() -> void:
27     >| slide1.visible = false
28     >| slide2.visible = false
29     >| slide3.visible = true
30     >| slide4.visible = false
31     >| slide5.visible = false
```

Abbildung 5.3: UI Skript (Beispiel)

```
func _on_timer1_timeout():
    >| Functions.viewport_sichtbar()
    >| ndttest.visible = true
```

```
func viewport_unsichtbar():
    >| viewport.visible = false
    >| viewport.process_mode = Node.PROCESS_MODE_DISABLED
    >| viewport1.enabled = false
```

Abbildung 5.4: Main-Viewport Funktion (unten) und Beispiel für Aufruf (oben)

5.3.3 Animationen und Interaktionen mit Akteuren

Um die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Interaktionen mit anderen Akteuren darzustellen, wurden auch 3D-Modelle von Menschen benötigt, die sich durch den Hangar bewegen, also animiert sind. Hierfür wurde ein 3D-Modell erstellt und mit einem Skelett versehen (Rigging). Die einzelnen Knochen (Armatures) werden Körperteilen zugeordnet und das 3D-Modell mit dem Skelett verbunden. Die Knochen können dann an den Gelenken verdreht werden, um verschiedene Posen zu erstellen. Die Animation funktioniert dann ähnlich zu einem Daumenkino. Es werden verschiedene Posen (Key Poses) für wichtige Bilder (Keyframes) erstellt, die dann nacheinander abgespielt werden, wobei die Bewegung zwischen zwei Posen automatisch durch Blender interpoliert wird. Die Key Poses für eine Animation, die das Modell laufen lassen soll, sind in Abbildung 5.5 zu sehen. Aufgrund des höheren Realismus einiger anderer 3D-Objekte wie dem Hangar und dem hohen Zeitaufwand für die Erstellung eines Menschenmodells mit ähnlichem Realismus wurde sich jedoch nach Erstellung der Animation zur Nutzung von bereits animierten Menschenmodellen entschieden.

Für die Interaktionen mit den Menschen wurden zwei bereits animierte Mensch-Modelle von Renderpeople und CGTrader genutzt. Der Ursprungs-Knoten des jeweiligen Menschen wird in einer konstanten Geschwindigkeit entlang eines festgelegten Pfades bewegt, während die Animation abgespielt wird. Hier ist eine Schwierigkeit, die festgelegte Geschwindigkeit so zu wählen, dass sie mit der Animation möglichst übereinstimmt, da es sonst aussieht, als würde der Mensch über den Boden gleiten. Dies wurde durch Ausprobieren zuerst richtig eingestellt. Anschließend wurden zwei boolesche Variablen eingeführt, die nur „wahr“ oder „falsch“ sein können. Ist die erste dieser Variablen auf „falsch“ gesetzt, wird die Animation sowie die Bewegung entlang des Pfades gestartet bzw. abgespielt. Die Interaktion mit einem Menschen wird

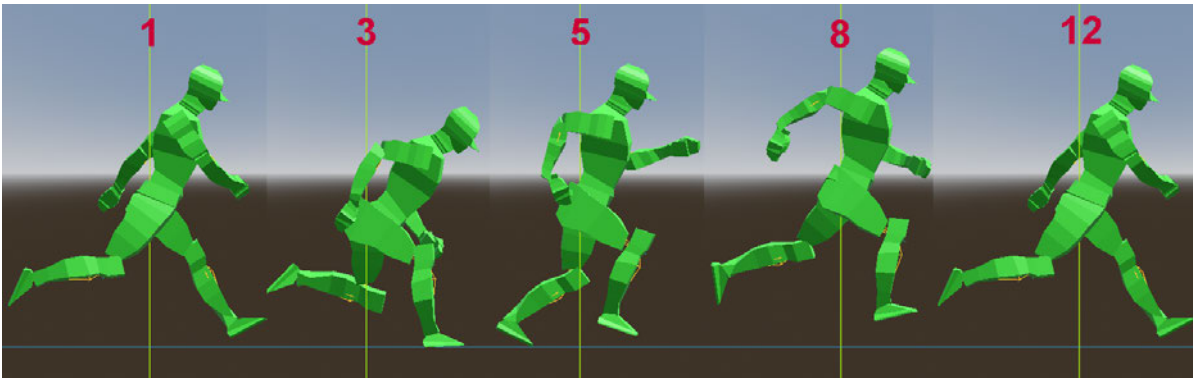


Abbildung 5.5: Key Poses für Renn-Animation (in rot die Frames)

durch den Laserpointer gestartet, mit dem der Mensch anvisiert werden muss. Um mit dem jeweiligen Menschen nur dann interagieren zu können, wenn es vom Spielablauf auch so geplant ist, müssen diese Interaktionen durch bestimmte Bedingungen gestartet werden. Bei dem Mitarbeiter vom Engineering (siehe in Abschnitt 5.1 den zweiten Schritt) zum Beispiel muss neben dem erforderlichen Abstand der Nutzers zum Menschen von 5 Metern, den beiden auf „falsch“ gesetzten Variablen auch das Tablet in der Hand gehalten werden. Wenn die Bedingungen erfüllt sind, wird eine Funktion aufgerufen, die die oben genannten boolesche Variablen auf „wahr“ setzt, wodurch Animation und Bewegung pausiert werden. Außerdem öffnet sich der in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Viewport mit den dazugehörigen UIs, anhand denen die Interaktion durchgeführt wird. Nach Beendigung der Interaktion wird die erste der beiden booleschen Variablen wieder auf „falsch“ gesetzt, wodurch Animation und Fortbewegung des Menschen weiterlaufen. Die zweite bleibt aber auf „wahr“ wodurch die Interaktion mit dem Menschen nicht ein zweites mal gestartet werden kann.

5.3.4 Virtuelles Tablet und Reparaturauftrag mit Stempel

Für den zweiten Schritt der Anwendung (siehe Abschnitt 5.1) wurde ein virtuelles Tablet erstellt, mit dem Fotos aufgenommen werden können. Hierfür wurde ein einfaches 3D-Modell in Blender erstellt. Um einen Bildschirm zu simulieren, wurde der Viewport2Din3D Asset (siehe Tabelle 5.1) auf das Tablett hinzugefügt, positioniert und ein UI für den Startbildschirm mit zwei App-Buttons für Kamera und Damage Report sowie ein UI für den Damage Report hinzugefügt. Außerdem wurde ein Kamera-Knoten an der Position der Kamera am Tablet positioniert.

Da ein Viewport nicht das Bild der Kamera darstellen kann, wurde an gleicher Position wie der Viewport ein sogenannter Sprite3D-Knoten zugefügt, der das Kamerabild als Textur darstellen kann. Dieser ist ein 2D-Bild (Fläche), dass aber im 3D-Raum angezeigt wird. Zu Beginn ist der Viewport dem dem Startbildschirm-UI zu sehen (Abbildung 5.6), auf dem mithilfe des Laserpointers der Kamera-App-Button gedrückt werden kann. Dieser Button ruft eine Funktion auf, die den Viewport unsichtbar und den Sprite3D-Knoten mit dem Kamerabild sichtbar macht (Abbildung 5.8).

Durch Drücken der Trigger-Taste wird nun eine Funktion aufgerufen, die eine Bildschirmaufnahme (also die in dem Moment angezeigte Textur) des virtuellen Bildschirms (Sprite3D) in einem Pfad abspeichert. Außerdem macht die Funktion den Sprite3D-Knoten wieder unsicht-

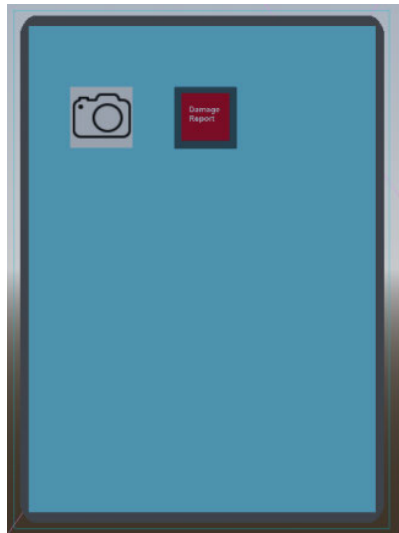


Abbildung 5.6: Tablet mit Startbildschirm-UI



Abbildung 5.7: Damage Report

bar und den Viewport mit dem Startbildschirm erneut sichtbar. Durch Drücken des Damage-Report-App-Buttons wird das UI des Damage Report sichtbar gemacht (Abbildung 5.7) und durch Drücken des „Bild hinzufügen“-Buttons wird die vorher gespeicherte Bildschirmaufnahme als Textur in einem dafür vorgesehenen Container geladen (Abbildung 5.9).

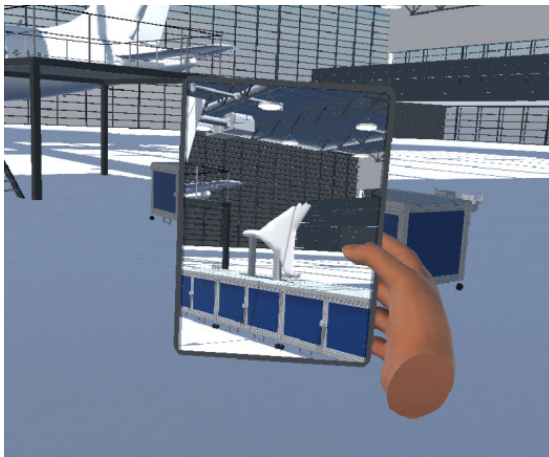


Abbildung 5.8: Kamera-App



Abbildung 5.9: Damagereport mit hinzugefügtem Foto

Der Reparaturauftrag wurde auf einem Clipboard platziert und ist, genau wie das Tablet, ein UI, welches in einem Viewport angezeigt wird. Der Inhalt realer Reparaturaufträge ist nicht öffentlich zugänglich und daher wurde hier eine eigene Version erstellt, die stark vereinfacht ist. An der Position, wo der Stempelabdruck platziert werden soll, ist eine Textur in einem dafür vorgesehenen Container, welches vorerst unsichtbar ist, und ein kugelförmiger Bereich plat-

ziert, der bei Eindringen eines Körpers ein Signal aussendet. Hier war eine Schwierigkeit, dass Gegenstände, die in der Hand gehalten werden, keine Signale bei Kollision mit dem Bereich aussenden, da sie dann als Teil der Hand gelten. Dieses Problem kann durch Anfügen eines weiteren Bereichs an den Stempel behoben werden. Nun muss jedoch festgelegt werden, dass das Signal bei Kollision des Bereichs mit einem anderen Bereich und nicht mit einem Körper ausgesendet wird. Durch Aussendung des Signals wird eine Funktion aufgerufen, welche die Stempeltextur sichtbar macht. In Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 ist der Reparaturauftrag vor und nach dem Stempeln zu sehen.

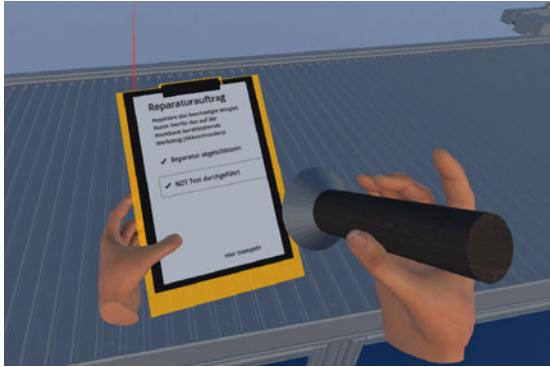


Abbildung 5.10: Reparaturauftrag vor dem Stempeln



Abbildung 5.11: Reparaturauftrag nach dem Stempeln

6 Validierung

Nach der Entwicklung der VR-Anwendung wurde eine Nutzerstudie durchgeführt. Durch sie sollte festgestellt werden, ob die VR-Anwendung als nutzerfreundlich wahrgenommen wird und auch, ob sie dem Nutzer die in Abschnitt 5 benannten Probleme der Winglet-Reparatur näher gebracht hat. Weiter sollte die Studie eventuelle Verbesserungspotentiale aufdecken. Hierfür wurden verschiedene standardisierte Fragebögen genutzt, sowie einige selbst erstellte Fragen, um gezielt auf anwendungsspezifische Aspekte eingehen zu können. Im folgenden Kapitel wird die Methodik dieser Studie beschrieben, sowie die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

6.1 Methodik

Die Teilnehmer der Studie haben nach einer kurzen Einführung in die Thematik einen kleinen, selbst erstellten Fragebogen ausgefüllt, um ihren Kenntnisstand zum Reparaturprozess zu überprüfen. Anschließend wurde die VR-Anwendung getestet, wobei die Teilnehmer selbstständig die in der Anwendung gestellten Aufgaben zu lösen hatten. Danach wurden erneut die vor Nutzen der Anwendung gestellten Fragen gestellt, sowie die beiden Fragebögen NASA Task Load Index (NASA TLX) und der User Experience Questionnaire (UEQ) ausgefüllt. Im Folgenden werden die genutzten Fragebögen kurz vorgestellt:

6.1.1 Anwendungsspezifische Fragen

Zur spezifischeren Überprüfung, ob die Nutzer durch die Anwendung etwas über den Reparaturprozess eines Winglets gelernt haben, wurden vor und nach der Nutzung folgende zwei Fragen gestellt, die in Stichpunkten beantwortet werden sollten:

- Welche Faktoren verzögern den Prozess der Wingletreparatur?
- Wo könnte hier Verbesserungspotential bestehen?

Ziel dieser Fragen war, zu sehen, ob sich durch die Anwendung die Sicht der Teilnehmer auf den Prozess verändert hat.

Nach der Anwendung wurden die Teilnehmer, zusätzlich zu den schon vor der Anwendung gestellten Fragen, nach Alter, Arbeitserfahrung im Flugzeugkontext sowie Erfahrung in der Nutzung von VR gefragt. Außerdem wurden zum Abschluss die Teilnehmer informiert, dass die in Abschnitt 5.1 vorgestellten zwei Problematiken dargestellt werden sollten, damit die Teilnehmer die Darstellung dieser gesondert bewerten konnten. Für die Fragen wurden verschiedene Skalen genutzt, die in Abschnitt 6.2 genauer erläutert werden.

6.1.2 User Experience Questionnaire

Der User Experience Questionnaire (UEQ) ist ein schneller und zuverlässiger Fragebogen zur Bewertung der User Experience von interaktiven Produkten, der 2005 von Andreas Hinderks, Martin Schrepp und Jörg Thomaschewski erstellt wurde. Er enthält 26 Items, welche aus zwei gegensätzlichen Adjektiven (zum Beispiel attraktiv-unattraktiv) bestehen und bei denen der Nutzer auf einer siebenteiligen Skala zwischen diesen beiden entscheiden kann. Der Fragebogen mit den 26 Items ist in Anhang A zu sehen. Die einzelnen Items werden anschließend in

sechs Skalen untergeordnet: Attraktivität, Durchschaubarkeit, Effizienz, Steuerbarkeit, Stimulation und Originalität. In Abbildung 6.1 ist ein Überblick über die Skalen und ihre Zusammenhänge zu sehen. Der UEQ wird vor allem wegen seiner schnellen Anwendbarkeit sowohl in Forschung als auch Praxis viel genutzt [64].

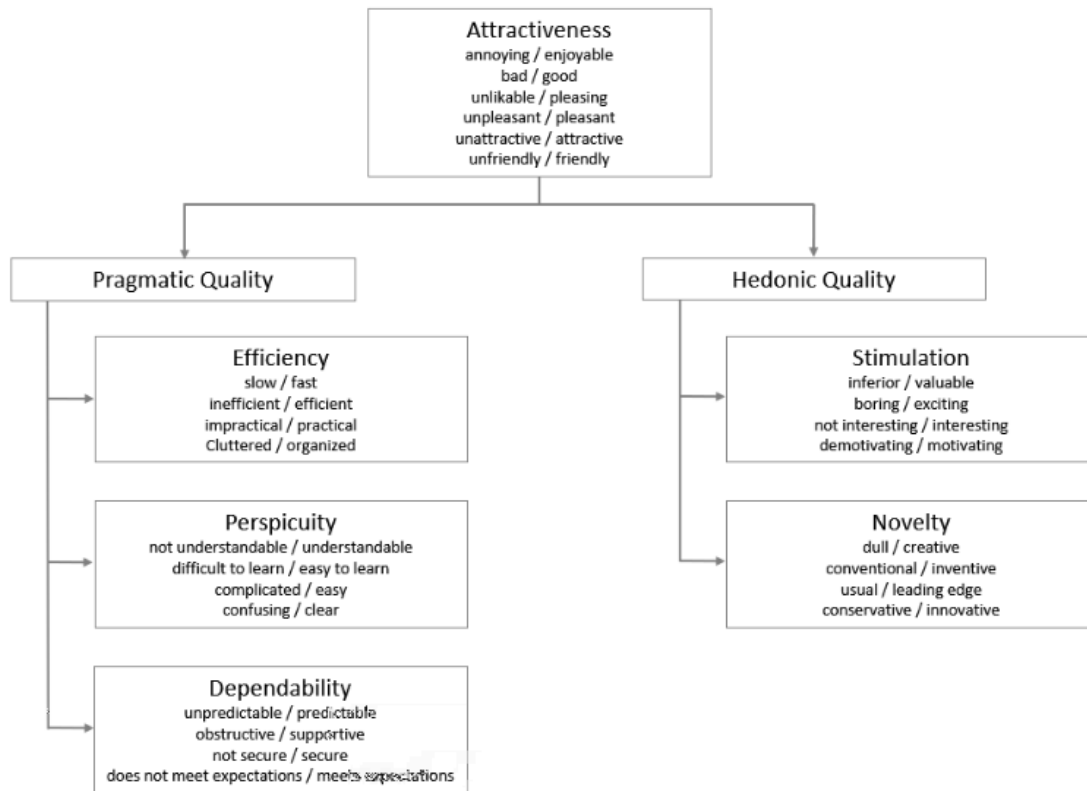


Abbildung 6.1: Skalenstruktur des UEQ [65]

6.1.3 NASA Task Load Index

Der NASA Task Load Index (NASA TLX) ist ein ursprünglich von der Human Performance Gruppe des NASA Ames Research Center um 1980 herum entwickelter Fragebogen zur subjektiv empfundenen Arbeitsbelastung bei Ausführung einer Aufgabe [66]. Heutzutage wird er für ein breites Spektrum von Anwendungen genutzt, zum Beispiel auch für die Flugzeug-Zertifizierung oder für Kontrollräume von Atomkraftwerken, und gilt als Maßstab für andere Fragebögen [67]. Besonders im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion findet er viele Anwendungsfälle. Der Fragebogen besteht aus sechs Aspekten: geistige Forderung (mental demand), physische Forderung (physical demand), Zeitdruck (temporal demand), Leistung (performance), Frustration und Aufwand (effort). Zu jedem dieser Aspekte gibt es eine Skala von 1-100, auf der der Nutzer in Fünferschritten einen Wert makieren kann. In der ursprünglichen Anwendung des Fragebogens konnten die Aspekte anschließend noch gewichtet werden, jedoch wird darauf heute oft verzichtet, so auch in dieser Nutzerstudie. Der NASA TLX Fragebogen sowie Erklärungen der Begriffe sind in Anhang B zu finden.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Demografie

An der Studie haben 14 Teilnehmer im Alter von 24 bis 40 Jahren teilgenommen, das Durchschnittsalter lag bei ca. 29,3 Jahren. Die Teilnehmer arbeiteten im Durchschnitt seit 3,7 Jahren im Flugzeugkontext, wobei der höchste Wert bei 20 Jahren und der niedrigste bei 0 Jahren lag. Die Erfahrung mit VR wurde in den Kategorien keine, ein bisschen, viel und sehr viel beantwortet. Zur Auswertung wurden diesen Kategorien Zahlen von null bis drei zugewiesen, wobei null keine Erfahrung und drei sehr viel Erfahrung bedeutet. Der so berechnete Durchschnittswert ist ca. 1,2, was bedeutet, dass die Teilnehmer im Schnitt ein bisschen Erfahrung in der Nutzung von VR hatten. Die Verteilung ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Der hohe Anteil an Personen ohne oder mit ein bisschen Erfahrung mit VR ist von Vorteil, da die Anwendung für eine Nutzergruppe erstellt wurde, die auch nicht zwingend Erfahrung in diesem Bereich haben muss.

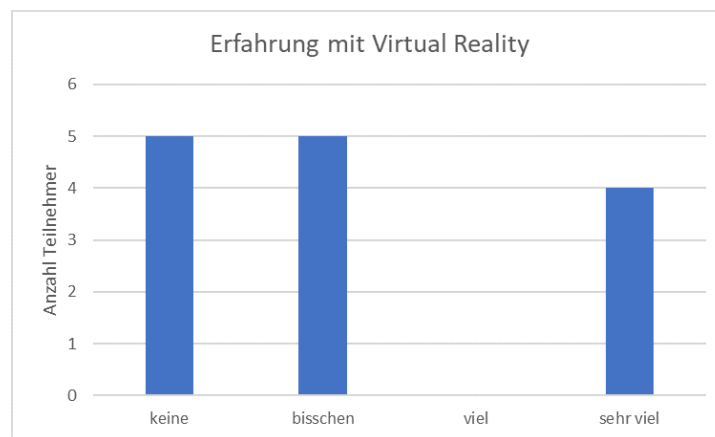


Abbildung 6.2: Vorerfahrung der Teilnehmer mit VR

6.2.2 UEQ

Zur Auswertung des UEQs wurden die 26 Auswahlmöglichkeiten aller Teilnehmer in das, von den Erstellern des UEQ bereitgestellte, Excel-Auswertungstool übertragen. Dieses errechnet daraus die Werte für die sechs Dimensionen für jeden Teilnehmer und anschließend daraus den Mittelwert sowie die Standardabweichung, wobei die Skalen von -3 (sehr schlecht) bis 3 (sehr gut) reichen. Werte zwischen $-0,8$ und $0,8$ können als mehr oder weniger neutral interpretiert werden, Werte darüber als positiv und darunter als negativ. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 6.1 zu sehen und in Abbildung 6.3 graphisch dargestellt.

In der Realität sind Werte über 2 und unter -2 jedoch unüblich, da Mittelwerte über eine Reihe von Teilnehmern gebildet werden und Teilnehmer oft extreme Antwortmöglichkeiten vermeiden [68]. Aufgrund dessen können die Mittelwerte zur genaueren Betrachtung auch wie in Abbildung 6.4 dargestellt werden.

Das Auswertungstool beinhaltet zusätzlich auch eine Datenbank mit den Ergebnissen des UEQs von 468 Studien mit 21.175 Teilnehmern zu unterschiedlichsten Produkten, mit denen das eigene verglichen werden kann [65]. Die einzelnen Dimensionen im Vergleich zu dieser Datenbank sind in Abbildung 6.5 zu sehen.

Tabelle 6.1: Ergebnisse UEQ-Skalen

UEQ Skala	Mittelwert	Standardabweichung
Attraktivität	1,58	0,50
Durchschaubarkeit	1,05	1,31
Effizienz	1,18	0,47
Steuerbarkeit	0,88	0,41
Stimulation	1,93	0,29
Originalität	1,46	0,86

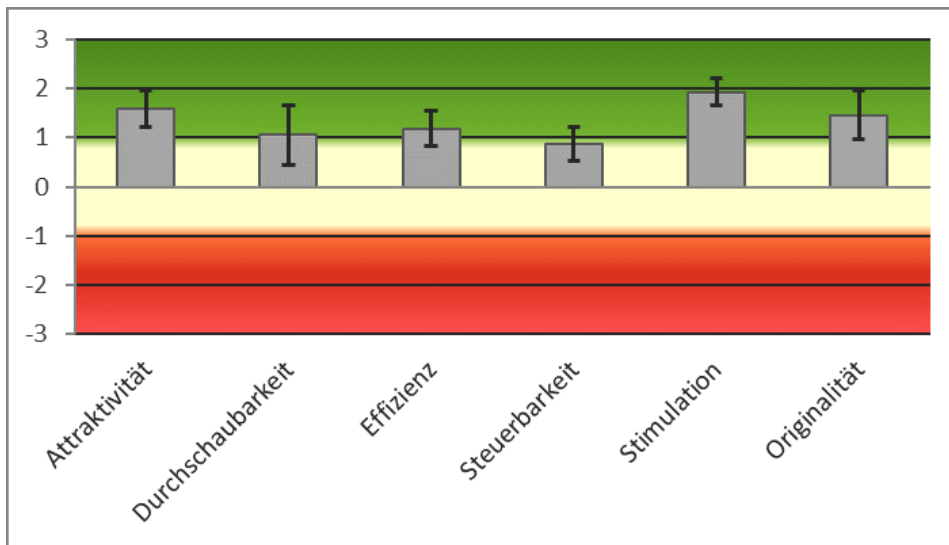


Abbildung 6.3: UEQ-Auswertungen (Mittelwerte und Standardabweichungen)

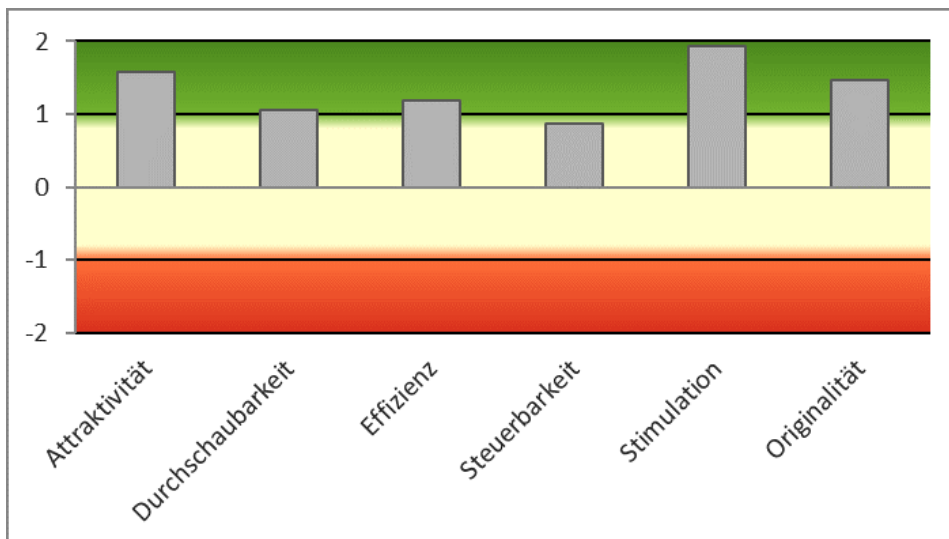


Abbildung 6.4: UEQ-Auswertungen Ausschnitt (nur Mittelwerte)

Die Ergebnisse zeigen in allen Kategorien Mittelwerte über 0,8, wodurch alle als positiv bewertet werden können. Besonders gut wurde die Stimulation (1,93), die Attraktivität (1,58) und die Originalität (1,46) bewertet.

Das Vergleichsdiagramm, zu sehen in Abbildung 6.5, verdeutlicht diese Ergebnisse. Hier wird

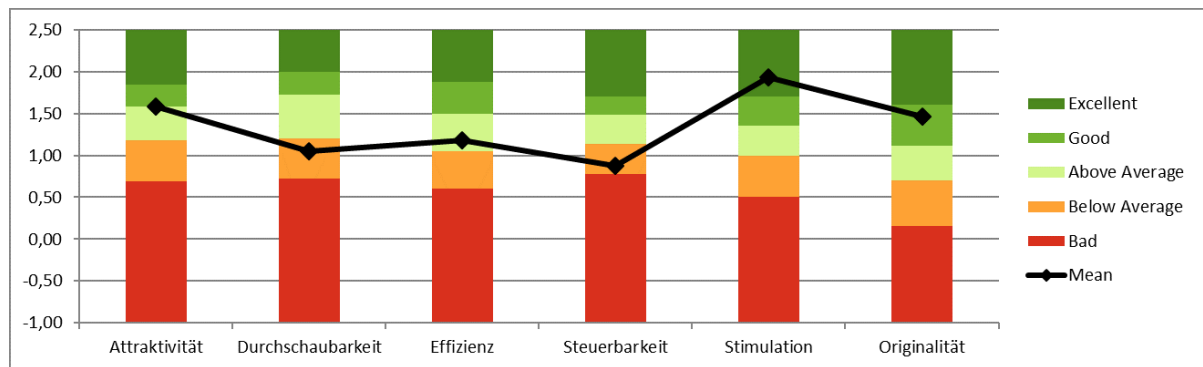


Abbildung 6.5: Vergleich mit Anwendungen aus Datenbank

pro Dimension auf einer fünfstufigen Skala von „Bad“ (rot) bis „Excellent“ (dunkelgrün) dargestellt, wie gut die Werte im Vergleich mit den Anwendungen aus der Datenbank sind. In Schwarz, durch Linien verbunden, können die Ergebnisse dieser Studie gesehen werden. Es fällt auf, dass die Werte der Dimensionen Attraktivität, Effizienz, Stimulation und Originalität über dem Durchschnitt liegen. Die Stimulation wird sogar als „Excellent“ bewertet.

Die Dimensionen der Durchschaubarkeit und Steuerung wurden von den Teilnehmern im Vergleich mit den anderen Dimensionen eher schlechter bewertet, liegen aber auch noch im positiven Bereich. Die Steuerbarkeit ist mit 0,88 am schlechtesten bewertet, die Durchschaubarkeit etwas besser mit 1,05. Auch im Vergleich mit der Datenbank fällt auf, dass diese beiden Dimension unterdurchschnittlich sind. Bei der Durchschaubarkeit fällt zusätzlich eine große Abweichung der Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer von 1,31 auf, was knapp 125% entspricht. Die Abweichungen der anderen Dimensionen liegen zwischen 0,29 (Stimulation) und 0,86 (Originalität), und fallen damit deutlich niedriger aus.

6.2.3 NASA TLX

Zur Auswertung des NASA TLX wurden alle Bewertungen der Teilnehmer in eine Tabelle eingetragen. Anhand dessen wurde für jeden einzelnen Aspekt ein Mittelwert, sowie die Standardabweichung gebildet. Außerdem wurde der Gesamtmittelwert über alle Aspekte gebildet. Als letztes wurden noch für die Bewertungen jedes Teilnehmers ein Mittelwert gebildet, also der Gesamtwert pro Teilnehmer. Alle Werte wurden mit den Interpretationswerten des NASA TLX verglichen, welche in Tabelle 6.2 zu sehen sind. Die Tabelle wurde noch um eine dritte Spalte erweitert (Anz. Teiln.), in der die Anzahl der Teilnehmer zu sehen ist, bei denen der Gesamtwert pro Teilnehmer in dem jeweiligen Bereich liegt.

Tabelle 6.2: Interpretation des NASA TLX [69]

Arbeitsbelastung	Bereich	Anz. Teiln.
niedrig	0 – 9	0
mittel	10 – 29	5
erhöht	30 – 49	7
hoch	50 – 79	2
sehr hoch	80 – 100	0

Der Gesamtmittelwert über alle Aspekte liegt bei ca. 34,17, wobei die Standardabweichung der einzelnen Aspekte zum Gesamtmittelwert von 3,73 zeigt, dass die einzelnen Werte alle sehr

dicht beieinander liegen. Die Standardabweichung der Gesamtwerte pro Teilnehmer liegt bei ca. 12,85 und damit etwas höher, aber immer noch im niedrigeren Bereich. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Aspekte sind in Tabelle 6.3 zu sehen und wurden in Abbildung 6.6 graphisch dargestellt.

Tabelle 6.3: Ergebnisse NASA TLX

Kategorie	Mittelwert	Standardabweichung
Mentale Forderung	38,93	23,22
Physische Forderung	31,07	22,03
Zeitdruck	29,29	27,31
Leistung	36,07	23,22
Aufwand	35,36	19,75
Frustration	34,29	19,08

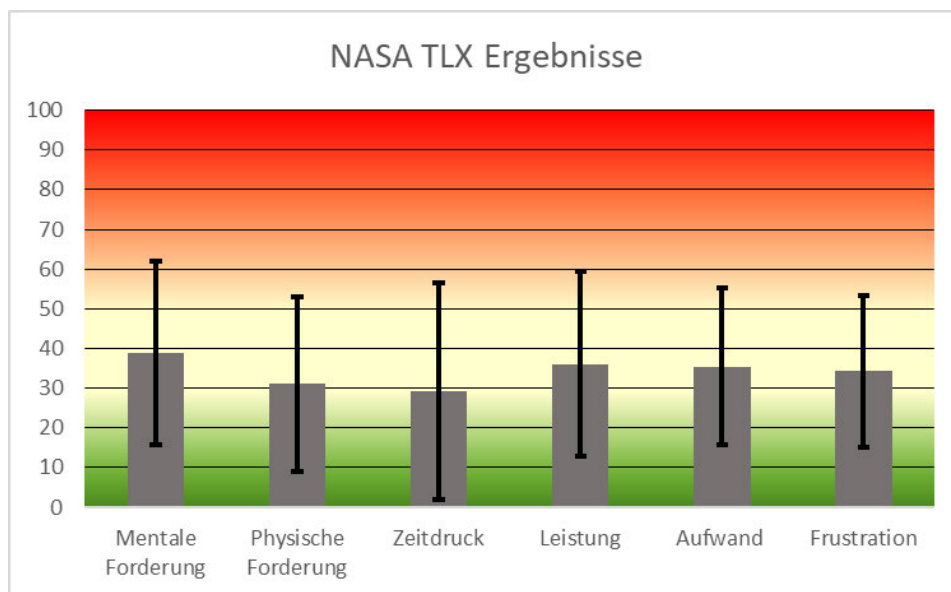


Abbildung 6.6: Ergebnisse NASA TLX mit Standardabweichung

Es ist zu sehen, dass alle Werte im Bereich der erhöhten Arbeitsbelastung liegen, bis auf den Zeitdruck, der jedoch genau auf der Grenze zwischen mittlerer und erhöhter Arbeitsbelastung liegt. Jedoch liegen auch alle Werte in der unteren Hälfte der Skala. Die mentale Forderung hat den höchsten Wert von 38,93, dicht gefolgt von den Werten der Leistung (36,07), des Aufwands (35,36) und der Frustration (34,29). Die niedrigsten Werte haben die physische Forderung (31,07) und der Zeitdruck (29,29). Auffällig sind die sehr hohen Standardabweichungen, die alle im Bereich von 19,08 bis 27,31 liegen, wobei besonders die hohe Abweichung beim Zeitdruck (27,31) ins Auge sticht, was ca. 93% des Mittelwerts entspricht. Die geringste Standardabweichung von 19,08, die bei der Frustration auftritt, ist mit ca. 56% des Mittelwerts immer noch recht hoch.

6.2.4 Anwendungsspezifische Fragen

Zur Auswertung der selbst erstellten Fragen wurden die stichpunktartigen Antworten der Teilnehmer zu den beiden Fragen, die sowohl vor als auch nach der Anwendung gestellt wurden, den beiden in Abschnitt 5.1 beschriebenen Problemen, also den verschiedenen Dokumentationsformen und vielen Interaktionen, zugeordnet, falls möglich. So wurde erfasst, ob die Teilnehmer vor der Anwendung bereits in Kenntnis der Probleme waren, und falls nicht, ob sie dann nach der Anwendung diese benennen konnten. Da die Stichpunkte jedoch nicht immer eindeutig sind, besteht hier ein gewisser Interpretationsspielraum, der das Ergebnis beeinflusst und somit sind die daraus gewonnen Erkenntnisse nur bedingt aussagekräftig, jedoch kann daraus eine Tendenz entnommen werden. Zur Auswertung wurde eine Tabelle erstellt, in der eingetragen wurde, ob das Problem der verschiedenen Dokumentationsformen bzw. der vielen beteiligten Akteure vorher und nachher bekannt waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt, wobei jeweils zwei Spalten für das Problem der verschiedenen Dokumentationsformen (Doku.) und der vielen beteiligten Akteure (Akt.) vorher (vor.) und nachher (nach.) zu sehen sind. Das Kreuz in einer Zelle gibt an, dass der Teilnehmer das Problem benannt hat.

Tabelle 6.4: Ergebnisse anwendungsspezifische Fragen

Teilnehmer	Doku. vor.	Doku. nach.	Akt. vor.	Akt. nach.
1	×	×		×
2				×
3		×		×
4	×	×		×
5	×	×		×
6	×	×	×	×
7		×		×
8				×
9				
10	×	×		×
11	×	×	×	×
12	×	×		×
13		×		
14		×	×	×

In Tabelle 6.4 kann gesehen werden, dass 11 der 14 Teilnehmer das Problem der verschiedenen Dokumentationsformen nach der Anwendung benannt haben, wobei 7 davon das Problem bereits bekannt war. Vier Teilnehmer haben so das Problem durch die Anwendung kennengelernt. Den Faktor der verschiedenen Akteure haben 12 der 14 Teilnehmer nach der Anwendung benannt, wovon nur 3 ihn vorher auch schon benennen konnten. 9 Teilnehmer haben ihn also neu gelernt. Nur drei Teilnehmer haben nichts dazugelernt; zwei von ihnen waren jedoch mit beiden Problemen bereits im Vorfeld vertraut.

Es wurde außerdem auf einer Skala von null (gar nichts) bis neun (sehr viel) gefragt, ob die Teilnehmer der Selbsteinschätzung nach etwas dazu gelernt haben durch die Anwendung. Der

Mittelwert hierfür beträgt 6,14 und die Standardabweichung 1,61.

Als letztes wurde nach Aufklärung der beiden Probleme noch direkt die Darstellung der beiden auf einer Skala von null (sehr schlecht) bis vier (sehr gut) von den Teilnehmern bewertet. Der Mittelwert liegt hier für das Dokumentationsproblem bei 3,29 (Standardabweichung bei 0,73) und für das Problem der vielen Akteure bei 3,57 (Standardabweichung bei 0,51). Die Darstellung der vielen beteiligten Akteure wurde also als im Schnitt als sehr gut bewertet, während die Darstellung der verschiedenen Dokumentationsformen im Schnitt als gut bewertet wurde.

6.3 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der vorgestellten Fragebögen interpretiert. Ziel ist es, festzustellen, ob die VR-Anwendung ihr Ziel erfüllt und wo eventuell Verbesserungspotential besteht. Hierzu werden die Ergebnisse der zuvor vorgestellten drei Fragebögen analysiert und in Zusammenhang gebracht.

Aus den Ergebnissen des UEQ lassen sich folgende Aussagen treffen: Aus den hohen Werten der Stimulation, Attraktivität und Originalität beim UEQ kann abgeleitet werden, dass die Anwendung ansprechend und angenehm gestaltet ist und innovativ bzw. neuartig auf die Nutzer wirkt.

Die Stimulation wird im Vergleich zu der Datenbank (Abbildung 6.5) als „Excellent“ bewertet, wodurch gesagt werden kann, dass die Anwendung im Vergleich zu anderen deutlich anregender ist. Jedoch muss erwähnt werden, dass die, in der Datenbank enthaltenen, Studien für Produkte unterschiedlichster Art sind, also Webseiten, Online-Shops, Apps etc. Hier liegt es in der Natur von VR, dass diese durch die Immersion als sehr anregend wahrgenommen wird.

Auffallend niedrig und im Vergleich zur Datenbank unterdurchschnittlich sind die Ergebnisse für die Durchschaubarkeit und Steuerbarkeit aufgefallen. Grund hierfür könnten kleine Fehler in der Anwendung sein, die unberechenbare Ereignisse auslösen. So wird der Nutzer zum Beispiel, wenn er das virtuelle Tablet in der Anwendung gegen seinen virtuellen Körper hält, plötzlich durch den Raum verschoben. Aber auch Schwierigkeiten mit der Controller-Handhabung können hier ein Problem darstellen. Während der Studie ist aufgefallen, dass Teilnehmer, die schlechter mit den Grundsteuerungen (Bewegung, Greifen) zurecht gekommen sind, dann auch größere Schwierigkeiten dabei hatten, die Aufgaben korrekt zu befolgen. Es kann also gesagt werden, dass Teilnehmer, die mehr Erfahrung mit VR haben bzw. intuitiv weniger mit der Steuerung überfordert waren, sich dann besser auf die Aufgaben an sich konzentrieren konnten und somit auch einen besseren Überblick über die Anwendung hatten, was auch die hohen Abweichungen bei der Durchschaubarkeit erklärt. Durch die Verbesserung der Steuerbarkeit steigt vermutlich also auch die Durchschaubarkeit. Abhilfe könnte hier vor allem vorherige Übung der Steuerbarkeit durch die Teilnehmer schaffen. Jedoch ist zu erwähnen, dass diese beiden Werte zwar schlechter, aber immer noch klar im positiven Bereich liegen. Auch hier bringt der Vergleich mit der Datenbank das Problem mit sich, dass die Studien verschiedener Produkte nur bedingt vergleichbar sind, da zum Beispiel die Steuerung einer Webseite mit einer Maus den meisten Menschen sehr vertraut ist.

Die Ergebnisse des NASA TLX deuten auf eine erhöhte Arbeitsbelastung in allen Kategorien des Fragebogens hin. Der Wert der mentalen Forderung ist am höchsten. Das ist typisch für VR-Anwendungen [70], da der Nutzer sich erst in der VR-Umgebung zurechtfinden und sich

auf neue Interaktionen konzentrieren muss, was das Abarbeiten von Aufgaben parallel dazu erschwert und dem Nutzer das Gefühl von Überforderung geben kann. Diese Faktoren werden durch die, im vorherigen Absatz festgestellte, schwierige Steuerbarkeit noch verstärkt.

Eine Erklärung für den hohen Wert der physikalischen Forderung könnte die teilweise motorisch anspruchsvolle Nutzung der Controller sein, da viele Tasten den Controllers gleichzeitig gedrückt werden müssen. Dies ist der Fall, wenn mehrere Interaktionen mit einem Controller gleichzeitig durchgeführt werden (zum Beispiel beim Halten eines Gegenstandes und gleichzeitigem Teleportieren). Der hohe Wert der physikalischen Forderung könnte also auch aus der schlechten Steuerbarkeit resultieren

Der Wert des Zeitdruckes ist der niedrigste Durchschnittswert, jedoch auch an der oberen Grenze der mittleren Arbeitsbelastung. Dies ist verwunderlich, da die Nutzer durch die Anwendung keinen zeitlichen Rahmen zur Bewältigung der Aufgaben vorgegeben bekommen haben. Eine mögliche Erklärung wäre hier, dass an den beiden Abschnitten der Anwendung, bei denen mit Menschen interagiert werden muss, diesen virtuell hinterhergelaufen werden muss, wodurch Zeitdruck entsteht. Da die Modelle der Menschen sich relativ schnell und unvorhersehbar durch den Raum bewegen und teilweise gleichzeitig zum Hinterherlaufen noch Gegenstände in der Hand gehalten werden müssen, kann so ein Gefühl von Stress entstehen. In diesem Fall könnte der hohe Wert des Zeitdruckes als positiv bewertet werden, da so Probleme bei der Interaktion verdeutlicht werden. Der hohe Wert der Standardabweichung zeigt, dass die subjektive Wahrnehmung hier sehr verschieden ist, was auch darauf zurückzuführen sein könnte, dass manche Teilnehmer den Zeitdruck auf den Zeitdruck zur Bearbeitung der Aufgaben bezogen und somit eher kleine Werte angegeben haben, und andere auf die subjektive Wahrnehmung das Stress-Gefühls bei verschiedenen Arbeitsschritten und dann, je nach subjektivem Empfinden, potentiell höhere Werte angegeben haben.

Die Zufriedenheit mit der eigenen Leistung wurde im Durchschnitt am zweithöchsten bewertet, wobei auch hier eine hohe Standardabweichung auffällt. Die Selbsteinschätzung der Leistung ist sehr subjektiv und durch die große Streuung können nur sehr vage Aussagen über den Ursprung des hohen Wertes getroffen werden. So neigen einige Menschen generell eher dazu, ihre Leistung zu gut oder zu schlecht einzuschätzen. Eine mögliche Ursache könnte jedoch auch bei der erschwerten Steuerung und Orientierung in der Anwendung liegen, wodurch der Nutzer das Gefühl bekommen kann, die Aufgaben zu langsam oder erst nach zu vielen Anläufen zu erledigen.

Die hohen Werte des Aufwandes kann auch auf die schwere Steuerbarkeit der Anwendung zurückgeführt werden, da einzelne Arbeitsschritte sehr umständlich auszuführen sind. So erfordert zum Beispiel das Anbringen des reparierten Winglets am Flügel eine hohe Präzision und es kann schnell vorkommen, dass das Winglet auf den Boden fällt und somit erneut aufgehoben und zum Flügel gebracht werden muss.

Der erhöhte Wert der Frustration kann entgegen Tabelle 6.2 als positiv interpretiert werden, da die Anwendung ein gewisses Maß an Frustration erzeugen soll, damit dem Nutzer die Probleme näher gebracht werden.

Die Ergebnisse der anwendungsspezifischen Fragen der Studie zeigen also, dass alle Teilnehmer (bis auf einen), die nicht bereits im Voraus die beiden dargestellten Probleme benennen konnten, durch die Anwendung zumindest eines dieser Probleme nun gelernt haben, wodurch das Ziel der Anwendung zwar erreicht wurde, es jedoch auch noch Verbesserungspotential gibt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Abfrage, ob die Teilnehmer der Selbsteinschätzung nach etwas dazu gelernt haben. Der Wert liegt hier über der Mitte der Skala, was heißt, dass die Teilnehmer sagen, dass sie etwas gelernt haben aber auch noch Potential besteht, noch

mehr zu lernen.

Die Bewertungen der einzelnen Darstellungen des jeweiligen Problems sind sehr gut ausgefallen, vor allem vor dem Hintergrund, dass Extrembewertungen tendenziell selten vorkommen [65]. Die Problemdarstellung der vielen verschiedenen Akteure kann vor diesem Hintergrund als gelungen bewertet werden. Trotz der guten Ergebnisse auch bei der Darstellung der verschiedenen Dokumentationsformen, zeigt Tabelle 6.4, dass deutlich weniger Leute dieses Problem gelernt haben. Daher besteht hier noch Verbesserungspotential, da in der aktuellen Anwendung zwar mit dem Reparaturauftrag in Papierform und dem Damage Report auf dem Tablet zwei Formen dargestellt wurden, diese sich aber vom Aussehen und Handhabung, wie in Abschnitt 5.3.4 gezeigt, wenig unterscheiden. Somit kommen die Nachteile der Verwendung verschiedener Dokumentationsformen nicht so gut zur Geltung. Durch die Bedienung des Tablets mit der virtuellen Hand oder der Einführung eines Kugelschreibers, der zu Bedienung des Reparaturauftrags benötigt wird, könnte dies gelöst werden.

Alles in allem kann gesagt werden, dass das Ziel der Anwendung, dem Nutzer Probleme des Reparaturprozesses eines Winglets näherzubringen, erreicht wurde. Mit dem Input aus der Befragung wäre es bei einer Weiterentwicklung der VR-Anwendung sinnvoll, zunächst die Steuerbarkeit zu optimieren.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine VR-Anwendung erstellt, die dem Nutzer Ineffizienzen des Reparaturprozesses eines Winglets näherbringen soll. Hierfür wurde dem Leser zuerst ein Überblick über MRO Prozesse im allgemeinen und anschließend über die MRO-Prozesse in der Luftfahrt gegeben. MRO Prozesse teilen sich in der Luftfahrt in die Kategorien „planbar“ und „nicht planbar“, also MRO Aktivitäten, die durch Ereignisse wie einem Schaden auftreten, auf. Die planbaren MRO-Aktivitäten werden oft noch in festgelegten Intervallen durchgeführt, was zu hohen Ausfallzeiten der Flugzeuge führt. Der Trend geht jedoch zur vorausschauenden Wartung, bei der durch Sensoren Daten gesammelt werden, um so den Zustand einzelner Bauteile in Echtzeit überwachen zu können. MRO-Aktivitäten können dann so geplant werden, dass sie nur durchgeführt werden, wenn der Zustand des Bauteils dies erfordert.

Außerdem wurde festgestellt, dass, durch hohe Sicherheitsanforderungen und benötigte Zertifizierungen, das Personal sehr stark spezialisiert ist und umfangreiche Ausbildung benötigt. Durch den Fachkräftemangel und den damit zusammenhängenden Wunsch, die Ausbildung effizienter zu gestalten, wird bereits die Integration innovativer Technologien wie VR in den Ausbildungsprozess durchgeführt.

Anschließend wurde der Reparaturprozess eines Winglets als Beispiel für einen MRO-Prozess genauer beleuchtet. Hierbei wurde festgestellt, dass der aktuelle Fokus oft auf den einzelnen Prozessschritten liegt, wodurch diese nacheinander abgearbeitet werden und somit der Informationsfluss von einem Prozessschritt zum nächsten erst erfolgt, wenn der vorherige abgeschlossen ist. Dadurch kann es zu Verzögerungen kommen, zum Beispiel durch Wartezeiten auf Materiallieferungen.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass durch die hohen Sicherheitsanforderungen eine sehr umfangreiche Dokumentation jedes Arbeitsschrittes nötig ist. Hier werden aktuell noch verschiedene Dokumentationsformen genutzt, was zu Inkompatibilitäten führt und Zeit durch das Übertragen von Informationen in andere Formate kostet.

Außerdem gehört zu jedem Prozessschritt spezialisiertes Personal, wodurch viel Interaktion und Übergaben zwischen Arbeitsschritten stattfinden muss. Dies kann zu Verzögerungen führen, da die einzelnen Akteure nicht immer verfügbar sein können und auch an anderen Objekten gleichzeitig arbeiten müssen.

Die letzten beiden genannten Probleme, also die verschiedenen Dokumentationsformen und die vielen Interaktionen mit anderen Akteuren, sollte nun mithilfe einer VR-Anwendung dargestellt werden. In der Anwendung durchläuft der Nutzer den gesamten Prozess einer Wingletreparatur, wobei dieser stark vereinfacht wurde. Die beiden Probleme wurden überspitzt dargestellt, indem der Nutzer einen Damage Report mithilfe eines Tablets sowie einen Reparaturauftrag in Papierform ausfüllen muss. Das Problem der vielen Akteure wurde dargestellt, indem der Nutzer in der Anwendung virtuellen Personen hinterherlaufen und diese abfangen muss.

Für die Erstellung und Bearbeitung von 3D-Modellen wurde die Open-Source Software Blender genutzt. Die 3D-Modelle wurden mithilfe von Godot zu einer VR-Anwendung zusammengefügt, wobei mit den XRTools die elementaren Funktionen wie das Greifen von Gegenständen und das Fortbewegen durch Teleportation bereits gegeben waren.

Anschließend wurde eine Validierung der VR-Anwendung durchgeführt, wofür eine Nutzerstudie durchgeführt wurde. Die 14 Teilnehmer der Studie sollten die Anwendung benutzen und vor- und nachher verschiedene Fragebögen ausfüllen. Hierfür wurden einige eigene anwen-

anwendungsspezifische Fragen entwickelt, die gezielt abfragen sollten, ob die Nutzer durch die Anwendung etwas gelernt haben und wie gut die Problemdarstellung umgesetzt wurde. Mit dem UEQ und dem NASA TLX wurden zusätzlich zwei bereits seit langem bewährte Fragebögen genutzt. Der UEQ ermöglicht die Nutzererfahrung zu bewerten sowie diese mit in einer Datenbank enthaltenen Ergebnissen des UEQs zu anderen Produkten zu vergleichen. Der NASA TLX ermöglicht eine Bewertung der Arbeitsbelastung, die während der Nutzung der Anwendung auftritt.

Die Ergebnisse des UEQ waren alle positiv, wodurch die Erfahrung, die die Anwendung den Nutzern bietet, als positiv bewertet werden kann. Durch den Vergleich mit anderen Produkten wurde deutlich, dass bei der Steuerbarkeit und damit zusammenhängend auch bei der Durchschaubarkeit noch Verbesserungspotential besteht.

Der NASA TLX Fragebogen ergab, dass die Arbeitsbelastung bei Nutzung der Anwendung erhöht ist. Es wurde allerdings festgestellt, dass die erhöhten Werte bei VR-Anwendungen üblich sind, da der Nutzer sich erst einmal in der VR-Umgebung und mit der Steuerung zurechtfinden muss.

Die anwendungsspezifischen Fragen ergaben, dass das Ziel der Anwendung, dem Nutzer die beiden Probleme zu verdeutlichen, erreicht wurde. Außerdem wurden die Darstellungen der Probleme als sehr gut bewertet, wobei bei der Darstellung der verschiedenen Dokumentationsformen noch Verbesserungspotential besteht.

8 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Prototyp einer VR-Anwendung zur Reparatur von Winglets geschaffen. Mithilfe einer im Rahmen der Arbeit konzipierten und durchgeführten Befragung von Probanden konnte nachgewiesen werden, dass das Ziel, den Nutzern Probleme des Prozesses mithilfe von VR näherzubringen, erreicht wurde. Die Anwendung könnte in Zukunft zu Schulungszwecken eingesetzt werden und so einen Beitrag zu Digitalisierung und Verbesserung von Winglet-Reparaturprozessen leisten.

Neben dem Einsatz zu Schulungs- und Ausbildungszwecken für Mitarbeiter, käme als mögliche weitere Zielgruppe auch Führungskräfte in Frage, die keinen detaillierten Überblick über den Gesamtprozess haben, jedoch über die Aufwendung von Ressourcen zur Verbesserung des Prozesses Entscheidungen treffen müssen. Mit einer solchen Anwendung würden sie in die Lage versetzt, Schwachstellen des bisherigen Prozesses zu erkennen und ihn so zu optimieren. Natürlich ist der hohe Nutzen einer VR-Anwendung gegen den hohen Zeit- und Ressourcenaufwand abzuwägen, den die Erstellung einer VR-Anwendung erfordert.

Die Befragung der Probanden zum Prototyp ergab jedoch auch an einigen Stellen noch Verbesserungspotential, vor allem im Hinblick auf die Steuerung der VR-Anwendung. Hier sind noch einige Punkte zu optimieren, was den Zeitrahmen dieses Projekts gesprengt hätte.

Ein Aspekt für die verbesserungswürdige Steuerung ist die nicht zufriedenstellend funktionierende Teleportfunktion von XRTools. Sie könnte durch Nutzung eines alternativen Assets ersetzt werden, das, falls nicht verfügbar, selbst erstellt werden müsste.

Es wurde außerdem festgestellt, dass Nutzer, die wenig Erfahrung mit VR-Anwendungen haben, stark von der „neuen Umgebung“ und den Steuerungen abgelenkt wurden. Dies kann behoben werden, indem den Nutzern im Voraus die Möglichkeit gegeben wird, sich mit den Bewegungen und Eindrücken vertraut zu machen. Hierfür könnte vor Beginn der eigentlichen Anwendung eine vereinfachte Übungsumgebung erstellt werden, zum Beispiel der genutzte Hangar ohne Flugzeug, aber mit greifbaren „Bauklötzen“. So könnte der Nutzer spielerisch die wichtigsten Funktionen erlernen, ohne dass ein Gefühl von Zeitdruck entsteht, wie es bei einem konkreten Arbeitsauftrag häufig ist.

Außerdem kann die Steuerung durch die Nutzung moderner VR-Hardware noch intuitiver gestaltet werden. So wäre das Greifen von Gegenständen mit den in Abschnitt 4.2 haptischen Handschuhen sehr ähnlich zum realen Greifen. Das Nutzen eines omnidirektionalen Laufbandes (Abbildung 4.9) würde den Einsatz einer Teleportfunktion erübrigen und die Fortbewegung intuitiver machen. Der Nutzer müsste dann jedoch, bedingt durch die großen Abmessungen des Hangars, größere Entfernungen zurücklegen. Generell kann in diesem Zusammenhang gesagt werden, dass stetig neue Ein- und Ausgabegeräte auf den Markt kommen, mit denen die VR-Anwendung modifiziert werden kann, wodurch die Realitätsnähe, die Performance und die Intuitivität gesteigert wird.

Die Integration von VR in den Arbeitsalltag in den verschiedensten Bereichen, aber auch die Nutzung von VR zu privaten Zwecken wie die Unterhaltung, befindet sich derzeit noch in den Startlöchern. In Zukunft ist zu erwarten, dass VR-Anwendungen im Berufsleben und im privaten Alltag immer gebräuchlicher werden. Immer mehr Menschen werden häufiger in die Si-

tuation kommen, VR zu nutzen und VR wird ein selbstverständlicher Bestandteil ihres Lebens werden. Man kann also zukünftig höhere Vorkenntnisse und einen routinierteren Umgang in diesem Bereich erwarten, wodurch in absehbarer Zeit langwierige Einarbeitungsphasen entfallen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Hinsch, *Industrielles Luftfahrtmanagement: Technik und Organisation Luftfahrttechnischer Betriebe*. Berlin, Heidelberg, GERMANY: Springer Berlin / Heidelberg, 2017.
- [2] J. Aigner, H. Meyer, F. Raddatz und G. Wende, „Digitalization of Repair Processes in Aviation: Process Mapping, Modelling and Analysis for Composite Structures,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.*, 2023. DOI: 10.25967/610058.
- [3] J. Aigner, C. Trapp, F. Raddatz und G. Wende, „Repair Processes in Aviation: Towards a simulation-ready Assessment Model for the Evaluation of Process Alternatives,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.*, 18. Okt. 2024. DOI: 10.25967/630295.
- [4] R. Schmücker, H. Meyer, R. Roedler, F. Raddatz und R. Rodeck, „Digitalization and Data Management in Aircraft Maintenance based on the Example of the Composite Repair Process,“ *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.*, 2021. DOI: 10.25967/550066.
- [5] E. Krokos, C. Plaisant und A. Varshney, „Virtual memory palaces: immersion aids recall,“ *Virtual Reality*, Jg. 23, Nr. 1, 5. März 2019. DOI: 10.1007/s10055-018-0346-3.
- [6] G. Makransky und L. Lilleholt, „A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education,“ *Educational Technology Research and Development*, Jg. 66, Nr. 5, Okt. 2018. DOI: 10.1007/s11423-018-9581-2.
- [7] O. A. Meyer, M. K. Omdahl und G. Makransky, „Investigating the effect of pre-training when learning through immersive virtual reality and video: A media and methods experiment,“ *Computers & Education*, Jg. 140, Okt. 2019. DOI: 10.1016/j.compedu.2019.103603.
- [8] R. Deckert und P. Dirrler, *Flugzeuginstandhaltung (MRO)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 11–14.
- [9] D. Green. „Maintenance Repair and Overhaul 101 | MRO 101,“ Click Maint CMMS. (), Adresse: <https://www.clickmaint.com/blog/maintenance-repair-and-overhaul> (besucht am 26.03.2025).
- [10] „Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) Explained,“ onupkeep. (), Adresse: <https://upkeep.com/learning/maintenance-repair-overhaul/> (besucht am 27.03.2025).
- [11] K. Scholle. „Zukunftsfähigkeit von Predictive Maintenance in Europa 2017,“ Statista. (), Adresse: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/819148/umfrage/zukunftsfahigkeit-von-predictive-maintenance-in-europa/> (besucht am 28.03.2025).
- [12] „Maintenance-Repair-and-Overhaul-Types.jpg (JPEG-Grafik, 750 × 472 Pixel).“ (), Adresse: <https://www.selecthub.com/wp-content/uploads/2023/02/Maintenance-Repair-and-Overhaul-Types.jpg> (besucht am 02.04.2025).
- [13] Q. Deng, „Optimal Decision Making for Aircraft Maintenance Planning,“ 2021. DOI: 10.4233/0bfb7a4a-366a-4492-b897-741d3422f9ff.
- [14] „Wartung, Reparatur und Betrieb (MRO) Marktgröße | Mordor Intelligence.“ (), Adresse: <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/maintenance-repair-operations-mro-industry> (besucht am 28.03.2025).

- [15] National Transportation Safety Board, „Loss of Control and Impact with Pacific Ocean Alaska Airlines Flight 261, Alaska Airlines Flight 261, McDonnell Douglas MD-83, N963AS About 2.7 Miles North of Anacapa Island, California, January 31, 2000,“ 2003.
- [16] D. Rodrigues und P. Lavorato, „Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Fundamentals and Strategies: An Aeronautical Industry Overview,“ *International Journal of Computer Applications*, Jg. 135, Nr. 12, 17. Feb. 2016. DOI: 10.5120/ijca2016908563.
- [17] W. S. Randall, T. L. Pohlen und J. B. Hanna, „Evolving a Theory of Performance-Based Logistics Using Insights from Service Dominant Logic,“ *Journal of Business Logistics*, Jg. 31, Nr. 2, 2010. DOI: 10.1002/j.2158-1592.2010.tb00142.x.
- [18] P. Shannon und P. Ackert, „Basics of Aircraft Maintenance Programs for Financiers,“ 2010.
- [19] H. Kinnison und T. Siddiqui, *Aviation Maintenance Management, Second Edition*, 2nd ed. New York, N.Y: McGraw-Hill Education, 2013, 1 S.
- [20] U. Ebner. „A-Check, C-Check, D-Check: Das Instandhaltungs-ABC.“ (), Adresse: <http://www.flugrevue.de/flugzeugbau/wartung-nach-plan-instandhaltungs-abc/> (besucht am 15.04.2025).
- [21] „Antworten aus dem Cockpit - Wie oft muss ein Flugzeug zur Inspektion?“ [airliners.de](http://www.airliners.de). (), Adresse: <https://www.airliners.de/wie-flugzeug-inspektion-antworten-cockpit/43722> (besucht am 15.04.2025).
- [22] „Flugzeugwartung | Linz Airport.“ (), Adresse: https://www.linz-airport.com/magazin/Flugzeugwartung_bba_619890 (besucht am 15.04.2025).
- [23] „Airplane Winglet Repair | Aircraft Winglet Maintenance,“ Aviation Technical Services. (), Adresse: <https://www.atsmro.com/component-repair/aircraft-structures/winglets/> (besucht am 05.05.2025).
- [24] „INCIDENT This is how bad looks the winglet of an easyJet A320 after being struck by lightning,“ AIRLIVE. (), Adresse: <https://airlive.net/emergency/2022/09/29/incident-this-is-how-looks-the-tail-of-an-easyjet-a320-after-being-struck-by-lightning/> (besucht am 05.05.2025).
- [25] „Luftfahrt | Composites United e.V.“ (), Adresse: <https://composites-united.com/branche/luftfahrt/> (besucht am 07.05.2025).
- [26] A. A. Baker, *Composite Materials for Aircraft Structures*. AIAA, 2004, 626 S.
- [27] „Verlag für Luftfahrttechnik - Information: Reparatur von Faserverbundwerkstoffen.“ (), Adresse: <https://www.gela-luftfahrtverlag.de/information-reparatur-von-faserverbundwerkstoffen/> (besucht am 07.05.2025).
- [28] D. J. Grubert, „Die Zukunft sehen: Die Chancen und Herausforderungen der Erweiterten und Virtuellen Realität für industrielle Anwendungen,“
- [29] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm und B. Jung, Hrsg., *Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [30] P. A. Rauschnabel, R. Felix, C. Hinsch, H. Shahab und F. Alt, „What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality,“ *Computers in Human Behavior*, Jg. 133, Aug. 2022. DOI: 10.1016/j.chb.2022.107289.

- [31] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi und F. Kishino, „Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum,“ H. Das, Hrsg., 21. Dez. 1995. DOI: 10.1117/12.197321.
- [32] „XR, MR, AR, VR, and AV: what are extended realities anyway?“ IRIS-BH. (), Adresse: <https://irisbh.com.br/en/xr-mr-ar-vr-and-av-what-are-extended-realities-anyway/> (besucht am 22.04.2025).
- [33] A. Dorfman. „Augmented reality games: Will this summer’s releases be booms or busts?“ MarTech. (), Adresse: <https://martech.org/augmented-reality-games-will-this-summers-releases-be-booms-or-busts/> (besucht am 22.04.2025).
- [34] M. Slater, C. Gonzalez-Liencre, P. Haggard u. a., „The Ethics of Realism in Virtual and Augmented Reality,“ *Frontiers in Virtual Reality*, Jg. 1, 3. März 2020. DOI: 10.3389/frvir.2020.00001.
- [35] C. Anthes, R. J. García-Hernández, M. Wiedemann und D. Kranzlmüller, „State of the art of virtual reality technology,“ März 2016. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500674.
- [36] G. Zhao, J. Orlosky, S. Feiner, P. Ratsamee und Y. Uranishi, „Mitigation of VR Sickness During Locomotion With a Motion-Based Dynamic Vision Modulator,“ *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Jg. 29, Nr. 10, Okt. 2023. DOI: 10.1109/TVCG.2022.3181262.
- [37] R. Xiao und H. Benko, „Augmenting the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Sparse Peripheral Displays,“ 7. Mai 2016. DOI: 10.1145/2858036.2858212.
- [38] T. Waltemate, I. Senna, F. Hülsmann u. a., „The impact of latency on perceptual judgments and motor performance in closed-loop interaction in virtual reality,“ 2. Nov. 2016. DOI: 10.1145/2993369.2993381.
- [39] B. Buy. „HTC VIVE PRO OVERVIEW,“ Best Buy Blog. (), Adresse: <https://blog.bestbuy.ca/bestbuy-showcase/htc-vive-pro-overview> (besucht am 23.04.2025).
- [40] „Nova-2-Strap_view-2_1200x1200.webp (PNG-Grafik, 1200 × 1200 Pixel) - Skaliert (76%).“ (), Adresse: https://www.knoxlabs.com/cdn/shop/files/Nova-2-Strap_view-2_1200x1200.webp?v=1706009098 (besucht am 22.04.2025).
- [41] B. Mayer. „Höhe, Innen-LED, Show: Fakten zur Las Vegas Sphere | invidis.“ (), Adresse: <https://invidis.de/2023/07/hoehe-innen-led-u2-fakten-zur-las-vegas-sphere/> (besucht am 23.04.2025).
- [42] „About SteamVR Base Station 2.0.“ (), Adresse: https://www.vive.com/au/support/vive-pro/category_howto/about-the-base-stations.html (besucht am 23.04.2025).
- [43] A. Krier, „Laser Projection Tracking,“ *TU Wien*, 2019.
- [44] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*, 2. edition, 17.printing. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018, 655 S.
- [45] „Was ist Hand Tracking in Virtual Reality? - VRX.“ (), Adresse: <https://vr.x.vr-expert.com/de/was-ist-hand-tracking-in-virtual-reality/> (besucht am 23.04.2025).
- [46] A. De Luca, „Ein- und Ausgabegeräte für VR-Systeme,“ Vortragsunterlagen, LMU München.

- [47] G. Zachmann, „Virtuelle Realität: Eingabegeräte,“ Vortragsunterlagen, Clausthal University, 2009.
- [48] „Teslasuit-Haptic.png (PNG-Grafik, 585 × 515 Pixel).“ (), Adresse: <https://www.vrnerds.de/wp-content/uploads/2018/01/Teslasuit-Haptic.png> (besucht am 23.04.2025).
- [49] „virtuix-omni.jpg (JPEG-Grafik, 1322 × 1346 Pixel) - Skaliert (77%).“ (), Adresse: <https://techcrunch.com/wp-content/uploads/2024/08/virtuix-omni.jpg> (besucht am 23.04.2025).
- [50] J. Wolfartsberger, R. Riedl, H. Jodlbauer u. a., „Virtual Reality als Trainingsmethode: Eine Laborstudie aus dem Industriebereich,“ *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Jg. 59, Nr. 1, Feb. 2022. DOI: 10.1365/s40702-021-00819-8.
- [51] „Airbus VR Procedure Training,“ [lufthansa-aviation-training.com](https://www.lufthansa-aviation-training.com/airbus-vr-procedure-training). (), Adresse: <https://www.lufthansa-aviation-training.com/airbus-vr-procedure-training> (besucht am 23.04.2025).
- [52] „Virtual reality—The Future of Flight Training | AIN,“ Aviation International News. (), Adresse: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2022-06-01/virtual-reality-future-flight-training> (besucht am 24.04.2025).
- [53] „Sicherheitstraining in der virtuellen Realität.“ (), Adresse: <https://www.fr.de/frankfurt/lufthansa-aviation-sicherheitstraining-virtuellen-realitaet-12698686.html> (besucht am 24.04.2025).
- [54] „Virtual Reality Training Lab - NASA.“ (), Adresse: <https://www.nasa.gov/virtual-reality-lab-doug/> (besucht am 17.04.2025).
- [55] S. C. Houston. „How NASA uses virtual reality to train astronauts,“ Space Center Houston. (), Adresse: <https://spacecenter.org/how-nasa-uses-virtual-reality-to-train-astronauts/> (besucht am 24.04.2025).
- [56] „What Virtual Reality (VR) means for Ground Operations,“ IATA, 2019.
- [57] S. Vardomatski. „Virtual Reality (VR) in Aircraft Maintenance Training: Benefits & Equipment,“ HQSoftware. (), Adresse: <https://hqsoftwarelab.com/blog/virtual-reality-aircraft-maintenance-engineering/> (besucht am 24.04.2025).
- [58] Á. Gómez-Cambronero, I. Miralles, A. Tonda und I. Remolar, „Immersive Virtual-Reality System for Aircraft Maintenance Education: A Case Study,“ *Applied Sciences*, Jg. 13, Nr. 8, 18. Apr. 2023. DOI: 10.3390/app13085043.
- [59] „Virtual reality | Airbus.“ (), Adresse: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-12-virtual-reality> (besucht am 24.04.2025).
- [60] „Godot XR Tools for Godot 4 - Godot Asset Library.“ (), Adresse: <https://godotengine.org/asset-library/asset/1698> (besucht am 27.04.2025).
- [61] „Godot Engine vs Unity: Which is Best in 2025.“ (), Adresse: <https://rocketbrush.com/blog/godot-vs-unity> (besucht am 27.04.2025).
- [62] G. Engine. „Godot Engine - Free and open source 2D and 3D game engine,“ Godot Engine. (), Adresse: <https://godotengine.org/> (besucht am 27.04.2025).
- [63] „VIVE Pro 2 Full Kit Specs | VIVE Deutschland.“ (), Adresse: <https://www.vive.com/de/product/vive-pro2-full-kit/specs/> (besucht am 26.04.2025).

- [64] B. Laugwitz, T. Held und M. Schrepp, „Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire,“ in *HCI and Usability for Education and Work*, A. Holzinger, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, S. 63–76. DOI: 10.1007/978-3-540-89350-9_6.
- [65] D. M. Schrepp, „User Experience Questionnaire Handbook,“
- [66] „TLX @ NASA Ames - Home.“ (), Adresse: <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/> (besucht am 03.05.2025).
- [67] S. G. Hart und M. Field, „Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later,“
- [68] „User Experience Questionnaire (UEQ).“ (), Adresse: <https://www.ueq-online.org/> (besucht am 03.05.2025).
- [69] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,“ in *Advances in Psychology*, Bd. 52, Elsevier, 1988, S. 139–183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [70] S. Criollo-C, J. Enrique Cerezo Uzcátegui, A. Guerrero-Arias, A. Dwinggo Samala, S. Rawas und S. Luján-Mora, „Analysis of the Mental Workload Associated With the Use of Virtual Reality Technology as Support in the Higher Educational Model,“ *IEEE Access*, Jg. 12, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3445301.

Anhang

Anhangsverzeichnis

A	User Experience Questionnaire	49
B	NASA Task Load Index	52

A User Experience Questionnaire

Bitte geben Sie Ihre Beurteilung ab.

Um das Produkt zu bewerten, füllen Sie bitte den nachfolgenden Fragebogen aus. Er besteht aus Gegensatzpaaren von Eigenschaften, die das Produkt haben kann. Abstufungen zwischen den Gegensätzen sind durch Kreise dargestellt. Durch Ankreuzen eines dieser Kreise können Sie Ihre Zustimmung zu einem Begriff äußern.

Beispiel:

attraktiv	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	unattraktiv
-----------	-----------------------	----------------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-------------

Mit dieser Beurteilung sagen Sie aus, dass Sie das Produkt eher attraktiv als unattraktiv einschätzen.

Entscheiden Sie möglichst spontan. Es ist wichtig, dass Sie nicht lange über die Begriffe nachdenken, damit Ihre unmittelbare Einschätzung zum Tragen kommt.

Bitte kreuzen Sie immer eine Antwort an, auch wenn Sie bei der Einschätzung zu einem Begriffspaar unsicher sind oder finden, dass es nicht so gut zum Produkt passt.

Es gibt keine „richtige“ oder „falsche“ Antwort. Ihre persönliche Meinung zählt!

Bitte geben Sie nun Ihre Einschätzung des Produkts ab. Kreuzen Sie bitte nur einen Kreis pro Zeile an.

	1	2	3	4	5	6	7		
unerfreulich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	erfreulich	1
unverständlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	verständlich	2
kreativ	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	phantasielos	3
leicht zu lernen	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	schwer zu lernen	4
wertvoll	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	minderwertig	5
langweilig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	spannend	6
uninteressant	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	interessant	7
unberechenbar	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	voraussagbar	8
schnell	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	langsam	9
originell	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	konventionell	10
behindernd	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unterstützend	11
gut	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	schlecht	12
kompliziert	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	einfach	13
abstoßend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anziehend	14
herkömmlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	neuartig	15
unangenehm	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	angenehm	16
sicher	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unsicher	17
aktivierend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	einschläfernd	18
erwartungskonform	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	nicht erwartungskonform	19
ineffizient	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	effizient	20
übersichtlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	verwirrend	21
unpragmatisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	pragmatisch	22
aufgeräumt	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	überladen	23
attraktiv	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unattraktiv	24
sympathisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unsympathisch	25
konservativ	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	innovativ	26

B NASA Task Load Index

RATING SCALE DEFINITIONS		
Title	Endpoints	Descriptions
MENTAL DEMAND	<i>Low/High</i>	How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?
PHYSICAL DEMAND	<i>Low/High</i>	How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?
TEMPORAL DEMAND	<i>Low/High</i>	How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?
PERFORMANCE	<i>good/poor</i>	How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?
EFFORT	<i>Low/High</i>	How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?
FRUSTRATION LEVEL	<i>Low/High</i>	How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?

Subject ID: _____ Task ID: _____

RATING SHEET

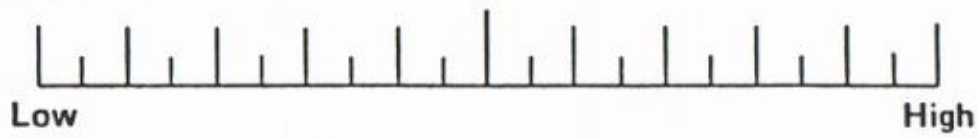
MENTAL DEMAND



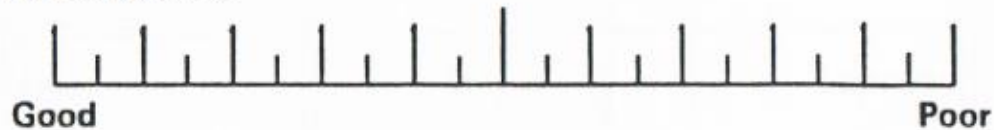
PHYSICAL DEMAND



TEMPORAL DEMAND



PERFORMANCE



EFFORT



FRUSTRATION



Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

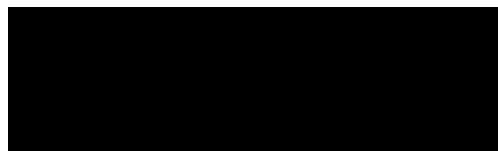
dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Reparaturprozess eines Winglets: Problemvisualisierung mittels Virtual Reality

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:



Ort

Datum

Unterschrift im Original