



**Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme
Arbeitsgruppe Managementinformationssysteme**

Thema:

**Optimierung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der
Automobilindustrie durch Einsatz von Augmented-Reality-Brillen**

Masterarbeit

Betreuer: Prof. Dr. Hans-Knud Arndt
Zweitbetreuer: Prof. Dr. Christian Hansen
Themensteller: M. Sc. Daniel Pohlandt

Vorgelegt von: Niko Klaiber

Abgabetermin: 25. Juni 2021

Eidesstattliche Erklärung

Name: Klaiber

Vorname: Niko

Studiengang: Master Wirtschaftsinformatik

Hiermit versichere ich, Niko Klaiber, an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Optimierung von Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Automobilindustrie durch Einsatz von Augmented-Reality-Brillen“ im Studiengang Wirtschaftsinformatik selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Inhalte und Passagen, die ich aus fremden literarischen Werken oder Darstellungen wissenschaftlicher oder technischer Art direkt oder indirekt übernommen habe, einschließlich der in elektronischen Medien veröffentlichten Quellen, habe ich unter Hinweis auf die jeweilige Quelle gekennzeichnet. Diese Versicherung bezieht sich sowohl auf Textinhalte als auch alle enthaltenden Abbildungen, Skizzen und Tabellen. Die Arbeit wurde bisher noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Mir ist bekannt, dass im Falle einer Täuschung die Arbeit mit nicht bestanden bewertet wird.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern die Einführung von Augmented-Reality-Technologien die Arbeit an der Endkontrolle von Kurbelgehäusen in der Mercedes-Benz AG unterstützen kann. Um ein problemspezifisches Hilfsmittel zu finden, werden verschiedene AR-Geräte ermittelt, gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer relevanten Eigenschaften verglichen. Es wird eine state-of-the-art Auswahl getroffen, welche Geräte für die vorliegende Frage am geeignetsten sind.

Für eine aussagekräftigere Evaluierung werden zwei AR-Applikationen implementiert, die den Anwendern sowohl Informationen als auch Bilder für die Endkontrolle bereitstellen, welche anhand unterschiedlicher Benutzeroberflächen gesteuert werden können. Die Funktionen und User Experience der Applikationen werden hinsichtlich der gewählten Geräte und Anforderungen des vorliegenden Szenarios konzipiert. Unter Berücksichtigung der aktuellen COVID-19-Situation wird eine Anwenderstudie mit den tatsächlichen Kontrolleuren durchgeführt, um die Applikationen möglichst plausibel zu bewerten. Die Ergebnisse, die auf Basis eines Fragebogens eingeholt wurden zeigen, dass AR-Brillen heutzutage noch nicht als geeignetes Hilfsmittel angesehen werden.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Kurzfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VI
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	3
1.2 Wissenschaftlicher Ansatz.....	4
1.3 Struktur der Arbeit.....	5
2. Grundlagen.....	6
2.1 Reality-Virtuality Kontinuum.....	6
2.1.1 Augmented Reality und Mixed Reality.....	7
2.1.2 Virtual Reality.....	9
2.2 Visualisierung von Augmented Reality.....	10
2.2.1 Head Mounted Displays.....	13
2.2.2 Handheld Displays.....	14
2.2.3 Head-down und Head-up Displays.....	15
2.2.4 AR mit Projektionen.....	16
2.3 Funktionsweise von Augmented Reality.....	18
2.4 Augmented Reality im Einsatz.....	21
2.4.1 AR im medizinischen Bereich.....	21
2.4.2 AR in der Produktion, Instandhaltung und Wartung.....	26
2.4.3 Daimler interne Anwendungsbereiche von AR.....	32
3. Auswahl des AR-Mediums auf Basis einer Ist-Analyse des Prüfprozesses.....	36
3.1 Prozessbeschreibung und Optimierungspotenzial.....	36
3.1.1 Prozessbeschreibung mit EPK.....	37
3.1.2 Optimierungspotential.....	38
3.1.3 Auswahl des AR-Mediums.....	40
3.2 Vorstellung geeigneter AR-Brillen.....	44

3.3	Konzepte	49
3.4	Erfolgskriterien des Versuchs	50
3.4.1	Implementierung der Konzepte	52
3.4.2	Vuzix Blade und Vuzix M400 Implementierung	52
3.4.3	Microsoft HoloLens 2 Implementierung	55
3.5	Versuch im Werk	57
4.	Präsentation und Analyse der Versuchsergebnisse	59
4.1	Ergebnisse des Testversuchs	59
4.2	Auswertung der Ergebnisse	64
4.3	Erkenntnisse	67
5.	Ergebnisse und Ausblick	69
6.	Literaturverzeichnis	72
7.	Anhang	i
7.1	Interview Transkript mit Daniel Pohlandt	i
7.2	Interview Transkript mit Dirk Heinsohn	iii
7.3	Fragebögen des Versuchs	v

Abkürzungsverzeichnis

EPK.....	Ereignisgesteuerte Prozesskette
AR.....	Augmented Reality
AV.....	Augmented Virtuality
VR.....	Virtual Reality
MR.....	Mixed Reality
HMD.....	Head Mounted Display
CAD.....	Computer Aided Design
VRC.....	Virtual Reality Center

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsgelände der ARENA2036.....	2
Abbildung 2: Reality-Virtuality Kontinuum	6
Abbildung 3: Daimlerverständnis von AR und MR.....	7
Abbildung 4: Pokémon Go AR Modus.....	8
Abbildung 5: MR Applikation Bremsschreiben Wechsel.....	9
Abbildung 6: Darstellungsarten von AR	10
Abbildung 7: ARenaXperience Indoor Navigation App - Mercedes-Benz AG	11
Abbildung 8: HoloLens2 Veranschaulichung der Ausgangssichten.....	12
Abbildung 9: Rehabilitationsversuch mit AR Projektor.....	13
Abbildung 10: Beispiel eines Handheld Displays aus dem Versuch von Masoni et al.....	15
Abbildung 11: Links: Mercedes-Benz AR Navigation - Rechts: Mercedes-Benz Head-up AR Navigation.....	16
Abbildung 12: AR Projektor aus dem Versuch von Gurevich et al.	17
Abbildung 13: TeleAdvisor Links: Fernunterstützer - Rechts: Arbeiter.....	18
Abbildung 14: Schwarz-weißer 2D Marker	19
Abbildung 15: 3D Überlagerung der Anatomie	22
Abbildung 16: AR Spiel <i>Brick 'a' Break</i>	23
Abbildung 17: Versuch von Sekhavat und Namani auf Monitorbasis.....	24
Abbildung 18: Versuch von Sekhavat und Namani auf Projektrobasis	24
Abbildung 19: Okklusionsvermeidungsansatz.....	25
Abbildung 20: Hindernisvermeidungsversuch von Sekhavat und Namani	26
Abbildung 21: Versuchsaufbau und Visualisierung	27
Abbildung 22: Ansicht des Versuchsaufbaus	28
Abbildung 23: Links Werkzeuggestisch - Rechts Überlagerte Ansicht des Motors.....	29
Abbildung 24: AR Anleitung – Festplattenaustausch.....	31
Abbildung 25: Fernunterstützung mit einem hand-held-display	32
Abbildung 26: Daimler.....	33
Abbildung 27: Daimler.....	34
Abbildung 28: EPK Symbole	36
Abbildung 29: EPK des Qualitätssicherungsprozesses am Beispiel von Kurbelgehäusen ...	38
Abbildung 30: Endkontrolle mithilfe von AR	40
Abbildung 31: EPK des Qualitätssicherungsprozesses mit AR System.....	41
Abbildung 32: AR Brillen im Vergleich.....	45
Abbildung 33: Microsoft HoloLens 2.....	46
Abbildung 34: Vuzix M400	47
Abbildung 35: Vuzix Blade	48

Abbildung 36: Konzeptübersicht	49
Abbildung 37: AugControl: Startszene - Kontrollszene - Endszene	53
Abbildung 38: AugControl - Kurbelgehäuse mit erkannten Problemen	54
Abbildung 39: Links AugControl Startmenü - Rechts Model-Based Tracking Raster des Kurbelgehäuses	55
Abbildung 40: Links Kontrollsicht mit Fehler 1 - Rechts Kontrollsicht mit Fehler 2	56
Abbildung 41: Versuchsaufbau des Pilotversuchs in Untertürkheim am 26.01.2021	57
Abbildung 42: Unterstützungsggrad der AR-Brille bei der täglichen Anwendung	60
Abbildung 43: Tragekomfort der AR-Brillen im Vergleich	60
Abbildung 44: Sichtfeldeinschränkung durch das Aufsetzen der AR-Brille	61
Abbildung 45: Bewertung der Bedienungsmöglichkeit der AR-Brille	62
Abbildung 46: Abschließende Beurteilung des Favoritenmodells	63
Abbildung 47: Abschließende Beurteilung über die Einführung des Favoriten	64

1. Einleitung

Die Einführung und Integration neuer Technologien in bestehende Prozesse ist in der Regel kompliziert, kostspielig und zeitaufwendig, kann aber bei Erfolg zu entscheidenden Wettbewerbsvorteilen führen. Entscheidend bei der Auswahl einer neuen Technologie ist, dass diese tatsächlich in der Lage ist, das bestehende Problem aufzugreifen und den Prozess optimieren zu können. Die Einführung einer neuen Technologie, nur der Technologie wegen, ohne zu berücksichtigen welche Probleme dadurch behoben werden können und inwiefern die Anwender einen Nutzen aus ihr ziehen können, ist sorgfältig abzuwägen. Ein geeigneter Ort, um die Einführung einer neuen Technologie zu evaluieren ist die ARENA2036 (Active Research Environment for the Next generation of Automobiles).

Die ARENA2036 ist eine Forschungseinrichtung, an der zahlreicher Konzerne und Unternehmen, wie die Daimler AG, Fraunhofer e.V, Bosch GmbH, Nokia, Siemens AG und viele weitere Forschung betreiben, die in enger Kooperation mit der Universität Stuttgart stattfindet. Der Fokus der Forschung ist das Automobil und die Produktion, was sowohl vom Standort Stuttgart als auch der Zahl im Namen der ARENA2036, dem 150-jährigen Jubiläum des Automobils abzuleiten ist. Größter Vorteil der Forschungseinrichtung ist der uneingeschränkte Fokus auf die Forschung und das Testen neuer Ideen und Konzepte, die nicht durch die grundsätzlich komplexen und hindernden Strukturen der Unternehmen und deren Produktionsstätten beeinträchtigt werden. Des Weiteren findet aufgrund der engen Zusammenarbeit in der ARENA2036 ein für alle Forschenden vorteilhafter und unternehmensübergreifender Wissenstransfer statt¹. Das Virtual Reality Center (im Folgenden VRC) ist ein wichtiger Bestandteil des Fahrzeugentwicklungsprozesses der Daimler AG mit dem Fokus auf Augmented Reality- (im Folgenden AR) und Virtual Reality-Technologien (im Folgenden VR). Die Aufgabe des VRCs besteht darin den Fahrzeugentwicklungsprozess mit geeigneten AR und VR Technologien zu begleiten und stetig zu verbessern. Dazu gehören unter anderem die Baubarkeitsuntersuchung, bei der mithilfe von VR Versuche konstruiert werden, um zu testen, ob der Zusammenbau eines Fahrzeugs problemlos vollzogen werden kann. Ebenfalls ein wichtiger Bereich, indem das VRC aktiv beteiligt ist, ist das Design von Exterieur und Interieur. Durch High End Visualisierungen kann das Fahrzeug bereits vor der Fertigung begutachtet und entsprechende Designänderungen vorgenommen werden. Des Weiteren testet und evaluiert das VRC in der ARENA2036 auch viele neue Konzepte, weshalb diese einen geeigneten Ort darstellt, um neue Technologien und Konzepte in der sonst streng geregelten Unternehmenswelt zu überprüfen und somit erst mit vielversprechenden Ansätzen in die produktive Welt einzutreten.

¹ ARENA2036 (2021)



Abbildung 1: Forschungsgelände der ARENA2036

(Quelle: ARENA2036)

Forschung im Bereich AR wird seit ungefähr 50 Jahren betrieben. In den letzten 10 Jahren konnten aufgrund der technischen Fortschritte und der Forschung im Bereich von AR deutliche Fortschritte erzielt werden, die AR wieder einen Schritt näher an die Einführung in den industriellen Kontext bringt². Ein überaus bedeutender Meilenstein dafür war die Veröffentlichung der Microsoft HoloLens in 2016, welche die erste kommerziell verfügbare Mixed-Reality-Brille (im Folgenden MR) war, die aufgrund der Tatsache, dass sie als Head-Mounted-Display (im Folgenden HMD) getragen werden kann, dem Nutzer weiterhin die Möglichkeit gibt beide Hände frei zu haben³. AR wird in verschiedensten Bereichen wie Instandhaltung, Wartung, Medizin, Unterhaltung und vielen weiteren bereits vorteilhaft eingesetzt^{4 5 6}.

Im Rahmen dieser Arbeit soll mit der Unterstützung des VRCs evaluiert werden, ob durch den Einsatz von AR eine Optimierung des im folgenden Abschnitt beschriebenen Prüfprozesses möglich ist und somit ein geeignetes technisches Hilfsmittel in der Endkontrolle darstellt.

² Palmarini et al. (2018) S. 1

³ Evans et al. (2017) S. 1

⁴ Marchi et al. (2013) S. 5

⁵ Fiorentino et al. (2014) S.10

⁶ Barsom et al. (2016) S. 4177

1.1 Motivation und Problemstellung

In den Produktionshallen der Daimler AG können zahlreiche voll automatisierte Prozesse beobachtet werden. Neben riesigen Schraubern, Pressen und Fließbändern sind oft nur vereinzelt Menschen zu sehen, deren Aufgabe darin besteht, Prozesse in Gang zu setzen oder zu stoppen, Maschinen vereinzelt zu steuern und bei Problemen einzugreifen. Die Maschine, welche sowohl in reiner Kraft als auch im fehlerfreien Replizieren identischer Vorgänge dem Menschen weit überlegen ist, steht hier im Mittelpunkt der Produktion.

In der Qualitätssicherungsabteilung steht jedoch nach wie vor der Mensch im Mittelpunkt, der aufgrund seiner Fähigkeit problemspezifisch und flexibel zu Handeln in der Endkontrolle nicht kosteneffizient von einer Maschine ersetzt werden kann.

In der globalisierten Welt, in der hochkomplexes Lieferkettenmanagement unabdingbar geworden ist, können bereits kleine Fehler bei der Endkontrolle zu hohen Kosten sowohl monetärer als auch zeitlicher Art führen, die bei allen Beteiligten der Lieferkette Verluste zur Folge haben würden. Je später der Zeitpunkt, an dem der Fehler entdeckt wird, desto gravierender die Konsequenzen, da die aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte möglicherweise rückgängig gemacht werden müssen. Um als Unternehmen oder Konzern nachhaltig konkurrenzfähig zu bleiben, bedarf es daher in regelmäßigen Abständen und vor allem wenn vielversprechende Technologien heranreifen, stets bestehende Unternehmensprozesse auf sich neu auftuende Optimierungspotentiale zu überprüfen. Prävention statt Korrektur ist das Stichwort⁷. Jedoch ist die direkte Folge eines regelmäßig optimierten, aber sich ändernden Prozesses, dass die Überprüfung des Prozesses sich ebenfalls ändern muss. Bezogen auf einen industriellen Rahmen, beispielsweise in der Endkontrolle bedeutet dies, dass der Wartungsprozess sich in regelmäßigen Abständen verändert und komplexer wird, was dafür spricht, den Mitarbeitern neben der Optimierung des Prozesses auch Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, die bei der Kontrolle assistieren können. Neben direkten monetären Folgen können aus mangelnder Qualität auch indirekte monetäre Folgen auftreten wie der Imageverlust. Ein relativ aktuelles Beispiel dafür ist die „Dieselaffäre“⁸ der Volkswagen AG, die durch die Medien weit verbreitet und langfristig in den Köpfen der Menschen präsent sein wird. Trotz größter Sorgfalt treten aber nach wie vor Probleme in der Endkontrolle auf, welche unter anderem auf Fehler menschlicher Natur zurückzuführen sind. Der Prozess der Qualitätssicherung in den Werken der Daimler AG findet anhand einer visuellen und haptischen Kontrolle statt (Stand Juli 2020). Die technische Unterstützung des Prozesses beläuft sich hierbei auf ein Softwaresystem, welches auf Basis von Aufnahmen jedes zur Endkontrolle beförderten Bauteils, Auffälligkeiten analysiert, diese hervorhebt und mit Informationen für den Kontrolleur auf einem separaten Bildschirm versieht.

⁷ Fiorentino et al. (2014) S. 2

⁸ Tagesschau (2020)

Durch die Verwendung einer AR-Brille während der Endkontrolle, im Gegensatz zur aktuellen Lösung, in welcher der Kontrolleur zwischen separaten Bildschirm und Prüfgegenstand wechseln muss, können durch das Anzeigen relevanter und prüfgegenstandsabhängiger Daten einige Vorteile entstehen. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass der Kontrolleur nur noch die abgebildeten Anweisungen befolgen muss, um die Kontrolle fehlerfrei und vollständig abzuschließen. Des Weiteren entfällt die Notwendigkeit sich auf Prüfgegenstand und Bildschirm gleichzeitig zu konzentrieren, was aufgrund der höheren kognitiven Belastung zu Leistungseinbußen führen kann⁹. Durch die AR-Brille kann der Fokus des Kontrolleurs gänzlich auf den Prüfgegenstand gelenkt werden, was wiederum zu einer Entlastung führt. Ein weiteres Problem in der Endkontrolle sind neuartige Qualitätsmängel, welche aufgrund von Verschleiß der Maschinen auftreten können. Vor Beginn jeder Schicht sind die Kontrolleure daher angewiesen, sich bezüglich neuartiger Fehler manuell zu erkundigen. Des Weiteren wird die Endkontrolle in einem Schichtsystem durchgeführt, wodurch ein zwangsläufiger Wechsel zwischen erfahrenen und unerfahrenen Kontrolleuren stattfindet. Dies stellt ein weiteres dar, den Prüfprozess mit guten Hilfsmitteln zu unterstützen. Die hohe Komplexität der Bauteile und die daraus resultierende Voraussetzung über Erfahrung und Wissen über die Abnahme eines solchen Produktes zu verfügen, stellt ein großes Problem für unerfahrenere Kontrolleure dar. Grund dafür ist die Problematik bei der Wissensweitergabe, die oftmals nicht ohne weiteren Aufwand möglich ist, weshalb in solchen Fällen häufig ein erfahrener Kontrolleur der Protagonist einer solchen Kontrolle wird¹⁰. Wenn die Einführung einer AR-Brille erfolgreich sein sollte, kann Wissen zentral gespeichert werden, wodurch es nicht mehr im selben Umfang notwendig wäre, erfahrene Kontrolleure während der Kontrolle anwesend zu haben. Sowohl Fehlerraten als auch Zeit könnten reduziert beziehungsweise eingespart werden, was im Umkehrschluss das Einsparen von Geld bedeuten würde.

1.2 Wissenschaftlicher Ansatz

Im Rahmen dieser Arbeit soll evaluiert werden, inwiefern die Einführung einer AR-Brille den Prozess der Endkontrolle und somit die Arbeitsschritte der Kontrolleure unterstützt und inwieweit die Technologie grundsätzlich auf Akzeptanz oder Ablehnung stößt. Die Evaluierung erfolgt zweistufig und untergliedert sich in einen Test- und einen Hauptversuch. Für den Testversuch werden Demoapplikationen vorbereitet, die dann in einer werksähnlichen Umgebung durchgeführt werden. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse anhand eines Fragebogens eingeholt und evaluiert. Auf Basis der neuen Erkenntnisse wird bei einem positiven Ergebnis ein neues finales Konzept entwickelt. Anhand des finalen Konzepts wird eine finale Applikation entwickelt, die dann im folgenden Hauptversuch erneut getestet wird.

⁹ Jacki O'Neill et al. (2011) S. 2

¹⁰ Masoni et al. (2017) Fiorentino et al. (2014) S. 3

Erneut werden die Ergebnisse der Hauptstudie anhand eines Fragebogens eingeholt und abschließend zusammengetragen und ausgewertet. Kennzahlen wie Fehlerraten, Durchlaufzeiten oder Ähnliches können aufgrund des Arbeitsschutzrechtes nicht eingeholt und somit nicht gemessen werden. Daher bestehen die Erfolgskriterien der Versuche aus der Akzeptanz und der Einschätzung über die Sinnhaftigkeit der neuen Technologie der zu testenden Kontrolleure.

1.3 Struktur der Arbeit

Mit Kapitel 2 schließt sich dieser Einleitung ein Grundlagenteil an, in dem zunächst die Begriffe AR, VR, MR und Augmented Virtuality (im Folgenden AV) voneinander abgegrenzt werden. Im Anschluss daran werden MR, VR und AR definiert und erläutert. Daraufhin werden die Bildschirmtypen optical-see-through und video-see-through charakterisiert und die Unterschiede herausgearbeitet. Nach der Beschreibung der Bildschirmtypen werden verschiedene Varianten aufgezählt und kurz beschrieben, durch die Augmentierungen für den Anwender sichtbar gemacht werden können. Daran anschließend wird die Funktionsweise von AR mit dem Fokus auf verschiedene Trackingvarianten erläutert. Zum Abschluss des 2. Kapitels wird eine kurze Literaturübersicht über Forschung und Anwendung von AR in den Bereichen Medizin, Produktion, Instandhaltung, Wartung und interner Anwendungsbereiche bei Daimler gegeben. In Kapitel 3, dem Hauptteil der Arbeit, wird zunächst der zu optimierende Prozess modelliert und im Anschluss das Optimierungspotential des Prozesses betrachtet. Des Weiteren wird im Rahmen der Analyse des Optimierungspotentials auch die Auswahl der AR-Brille diskutiert. Im Anschluss wird der eigene zu prüfende Ansatz beschrieben und auf Basis des Ansatzes eine Auswahl dreier verschiedener AR-Brillen getroffen und begründet. In Vorbereitung auf den Versuch im Werk werden zunächst die Erfolgskriterien definiert und beschrieben. Anschließend werden Testapplikationen implementiert und vorgestellt. Den Abschluss des 3. Kapitels bildet die Versuchsdurchführung. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse, die in Form eines Fragebogens erhoben wurden, beschrieben und visualisiert. Im Anschluss findet eine Analyse der Ergebnisse statt, die dann in generelle Ableitungen und Erkenntnisse überführt werden. In Kapitel 5 werden die wesentlichen Meilensteine dieser Arbeit in Form einer Zusammenfassung dargestellt und ein Ausblick auf zukünftige Forschungen gegeben.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert. Im ersten Abschnitt werden Augmented Reality, Augmented Virtuality, Virtual Reality *und* Mixed Reality anhand des *Reality-Virtuality Kontinuums*¹¹ von Milgram voneinander abgegrenzt. In den folgenden Abschnitten werden dann jeweils AR und MR genauer erläutert und definiert. Unter anderem wichtig ist hierbei, die Unterscheidung der Auffassung der Begriffe zwischen Literatur und der Daimler AG, um Missverständnissen vorzubeugen. Anknüpfend wird die Funktionsweise von AR Brillen beschrieben. Im Anschluss daran werden verschiedene Arten von Anzeigemöglichkeiten erläutert, auf dessen Basis AR in der Realität sichtbar und somit nutzbar gemacht werden kann. Daran anknüpfend werden Beispiele für AR Implementationen in den Bereichen Unterhaltung, Medizin und Industrie beschrieben und deren Vorteile aufgezeigt.

2.1 Reality-Virtuality Kontinuum

Im *Reality-Virtuality Kontinuum*¹² von Milgram grenzen die Autoren die Begriffe Augmented Reality, Augmented Virtuality und Mixed Reality voneinander ab. Ziel der Arbeit war es unter anderem eine einheitliche Unterscheidung der Begriffe auf Basis eines Kontinuums zu schaffen und den Zusammenhang zwischen AR, AV und MR zu erklären.

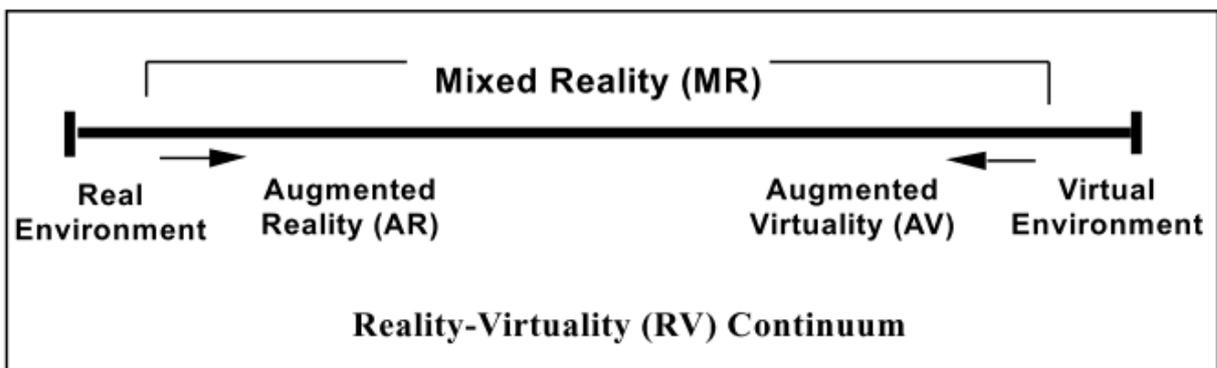


Abbildung 2: Reality-Virtuality Kontinuum

(Quelle: Milgram et al., 1995)

Auf der linken Seite von Abbildung 2 ist die echte Welt dargestellt (Real Environment). Die echte Welt umfasst alles, was in der Realität zu beobachten ist und repräsentiert das eine Extrem des Spektrums. Dabei ist es unerheblich, ob die echte Welt direkt durch das Auge oder indirekt durch jegliche Art von Oberfläche betrachtet wird. Die andere Seite des Spektrums ist die virtuelle Welt (Virtual Environment). Die virtuelle Welt besteht aus einer Simulation, in der keine echten Objekte zu sehen sind, sondern Simulationen von echten oder erfundenen

¹¹ Milgram et al. (1995)

¹² Milgram et al. (1995)

Objekten. Diese wird auf Basis eines Bildschirms abgebildet oder immersiv in Form eines HMD. Sobald Merkmale beider Spektren vereint werden, beispielsweise ein virtuelles Objekt in der echten Welt angezeigt wird oder reale Objekte in einer sonst ausschließlich virtuellen Welt sichtbar werden, sprechen die Autoren von einer gemischten Realität (Mixed Reality). In der gemischten Realität existieren zwei weitere Unterteilungen: AR und AV. AR ist im Reality-Virtuality Kontinuum eher links angeordnet, was bedeutet, dass der Bezug zur echten Welt größer ist als zur virtuellen Welt. Nach dem Verständnis der Autoren wird alles als AR bezeichnet, sobald virtuelle Inhalte mit der echten Welt überlagert werden. Im Gegensatz dazu ist AV in der Abbildung sehr weit rechts angeordnet. Eine gänzlich simulierte Welt, in der vereinzelt echte Objekte sichtbar sind, wie beispielsweise die Hände eines Anwenders, wird als AV bezeichnet¹³. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Formen von MR genauer betrachtet und definiert.

2.1.1 Augmented Reality und Mixed Reality

AR ist eine Technologie, die es ermöglicht, die physische Welt in Echtzeit mit umweltabhängigen, computergenerierten Informationen direkt oder indirekt zu bereichern¹⁴.

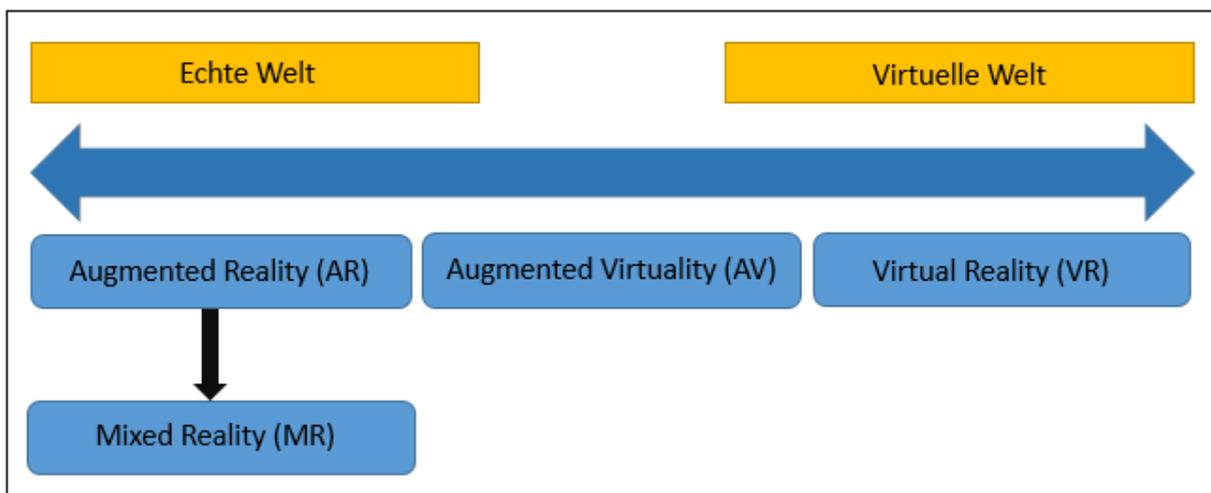


Abbildung 3: Daimlervverständnis von AR und MR

(Quelle: Interview mit Daimlermitarbeiter)

Nach dem Verständnis von Milgram ist AR eine Spezialisierung von MR, wobei der Anwender die reale Welt mit generierten Daten überlagert¹⁵. Im Rahmen dieser Arbeit werden AR und MR jedoch nach dem Verständnis der Daimler AG angewandt, welche sich aus der Industrie entwickelt hat. In Abbildung 3 ist die Sicht der Daimler AG dargestellt. Hierbei ist die Position von MR im Gegensatz zu Milgram et al. eine andere. AR stellt somit keine Spezialisierung

¹³ Milgram et al. (1995) S. 283

¹⁴ Carmigniani et al. (2011) S. 342

¹⁵ Milgram et al. (1995)

mehr von MR dar. Mit anderen Worten: Jegliche Form der Augmentierung der realen Welt ist zunächst einmal AR. Ein Beispiel hierfür wäre das Anzeigen von Informationen oder Bildern, unabhängig von der Umwelt, wie es in Pokémon Go möglich ist. In Abbildung 4 wird ein fiktives, virtuelles Wesen in einem geschlossenen Raum abgebildet. Die Positionierung des Pokémons wurde dabei selbst bestimmt und ist daher unabhängig von der Umwelt.

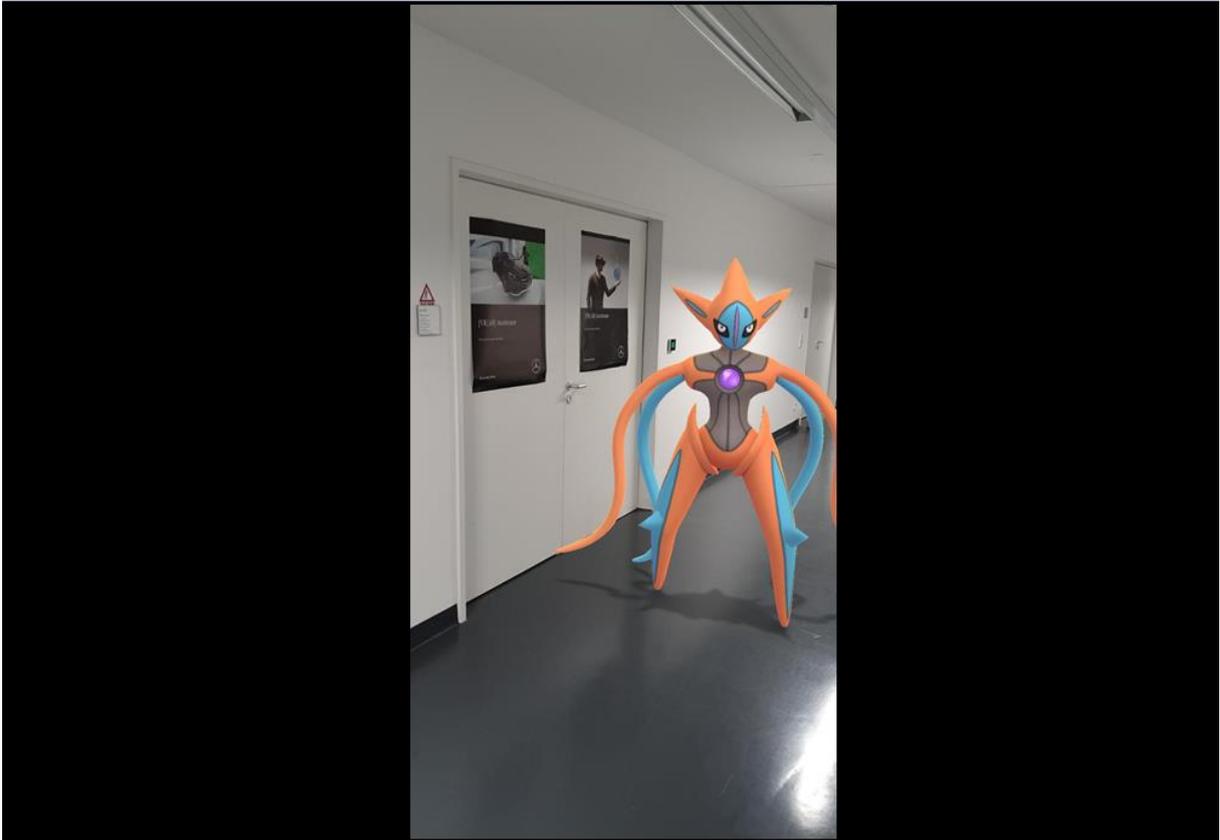


Abbildung 4: Pokémon Go AR Modus

(Quelle: Eigene)

Von MR wird gesprochen, sobald eine Kontextabhängigkeit zwischen der realen Welt und dem angezeigten Inhalt vorliegt. Ein Beispiel hierfür wäre eine lagerichtige Überdeckung eines realen Objektes mit simulierten Inhalten. Ausschlaggebend für MR ist somit die Kontextabhängigkeit, welche erst durch die lagerichtige Überdeckung entsteht, wohingegen eine kontextunabhängige Visualisierung wiederum nur als AR bezeichnet werden würde¹⁶. In Abbildung 5 ist eine MR Applikation zu sehen, die mithilfe der Microsoft HoloLens durchgeführt wird. Die Applikation erkennt das Bauteil, in diesem Fall die Bremse und bildet lagerichtig zur Bremse ein Rad ab.

¹⁶ Pohlandt (2020)

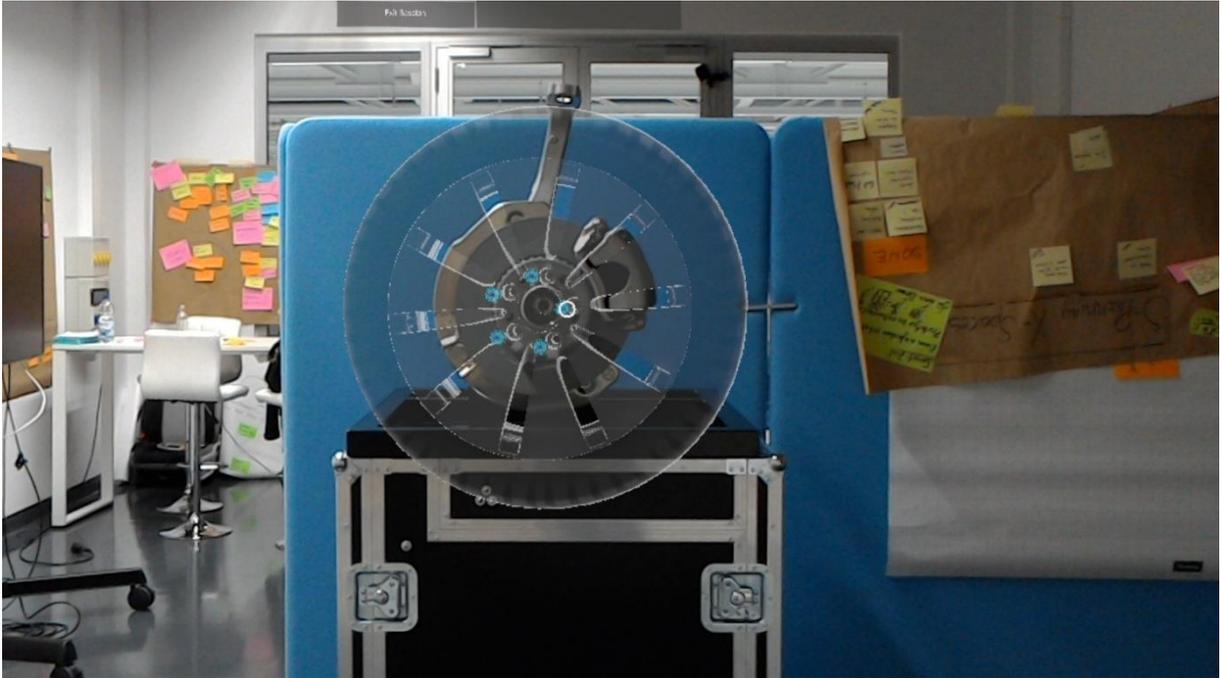


Abbildung 5: MR Applikation Bremsschreiben Wechsel

(Quelle: Eigene)

Nach dem Verständnis dieser Arbeit, welche konform zur Ansicht der Daimler AG ist, erfüllt AR die folgenden Kriterien^{17 18}:

- AR kombiniert sowohl simulierte als auch reale Objekte und das Resultat wird in der echten Welt dargestellt
- Die reale Welt ist immer sichtbar und darf nicht vollständig mit simulierten Inhalten überlagert sein
- Simulierte Inhalte sind ebenfalls permanent sichtbar und können in Abhängigkeit zur realen Welt stehen

AR ist somit eine sehr mächtige und vielseitig einsetzbare Technologie. Forschung findet in verschiedensten Bereichen wie beispielsweise Produktvorstellungen/ Werbung, Unterhaltung, Lehre, Medizin, Fertigung und Wartung statt¹⁹.

2.1.2 Virtual Reality

Im Gegensatz zu AR, in welcher der Anwender die echte Welt mit Informationen überlagert, wird in VR eine virtuelle Welt mithilfe eines Computers generiert, in die der Anwender komplett eintaucht. Die Gestaltung der virtuellen Welt kann entweder eine Simulation der echten Welt oder einer imaginären Welt sein²⁰. Die Erschaffung der imaginären Welt kann je nach

¹⁷ R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre (2001) S. 34

¹⁸ Pohlandt (2020)

¹⁹ Bottani und Vignali (2019) S. 293ff

²⁰ Khan et al. (2011) S. 1

Anwendungsbereich frei gestaltet werden und unterliegt keinerlei Restriktionen. Im *Reality-Virtuality Kontinuum*²¹ ist VR als Virtual Environment bezeichnet. Links neben Virtual Environment befindet sich AV, in der das Anzeigen realer Objekte in einer sonst simulierten Welt möglich ist. Da in VR keine realen Objekte mit einer simulierten Welt überlagert werden, sondern ausschließlich simulierte Objekte in einer simulierten Welt sichtbar sind, ist das Virtual Environment im *Reality-Virtuality Kontinuum* rechts neben AV positioniert. In Abbildung 3, die das Daimlerverständnis abbildet, ist VR ebenfalls rechts neben AV positioniert. Hervorzuheben ist, dass die einzelnen Bereiche im Kontinuum keine eindeutigen Grenzen haben, sondern vielmehr einen fließenden Übergang besitzen.

2.2 Visualisierung von Augmented Reality

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten zur Darstellung von AR präsentiert. Zunächst werden zwei verschiedene Technologien beschrieben, durch welche die Anzeige der augmentierten Umgebung ermöglicht wird. Unterschieden wird hier in optical see-through und video see-through Bildschirme. Im Anschluss daran werden verschiedene AR-Medien vorgestellt, welche auf Basis dieser beiden Technologien die augmentierte Umgebung darstellen können.

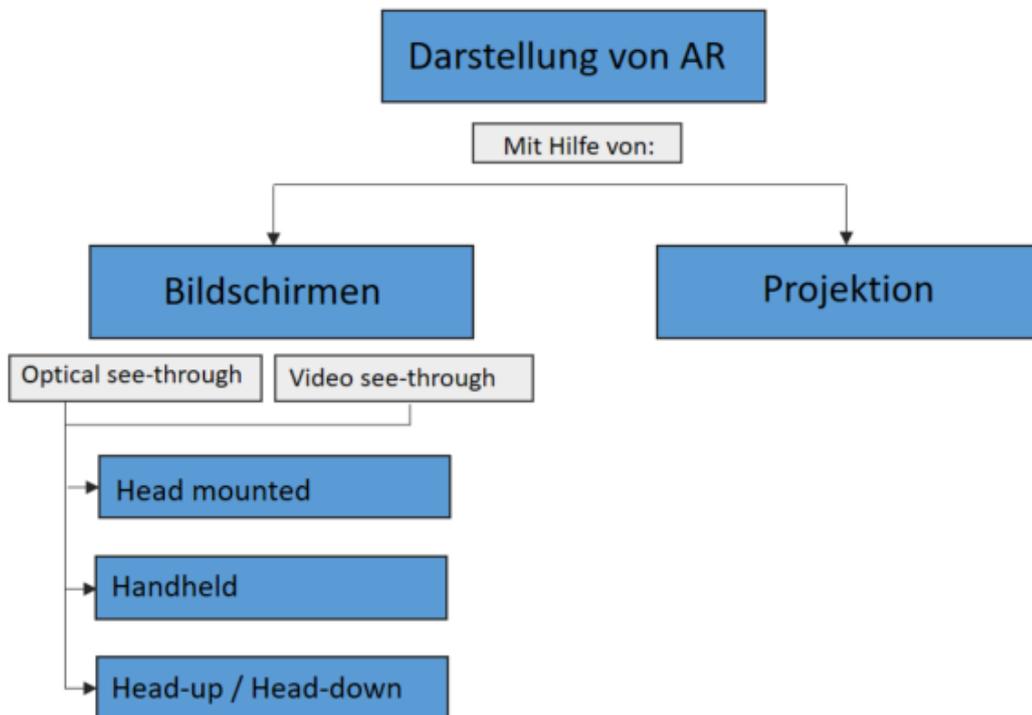


Abbildung 6: Darstellungsarten von AR

(Quelle: Eigene)

²¹ Milgram et al. (1995)

Zunächst benötigt AR grundsätzlich eine Anzeigemöglichkeit, um Augmentierungen in der realen Welt für den Anwender sichtbar zu machen. In der Regel werden dazu Bildschirme verwendet, welche entweder mit optical see-through oder video see-through Technologien ausgestattet sind.

Die Technologie video see-through zeigt eine Aufnahme der Umgebung an, welche augmentiert wurde. Zunächst wird durch eine Kamera die Umwelt aufgenommen. Der Aufnahme wird dann in einem folgenden Schritt die Augmentierung hinzugefügt, welche dann dem Anwender auf einem Bildschirm angezeigt wird²². Der große Vorteil der video see-through Technologie besteht darin, dass sie mit einem vergleichsweise geringen Berechnungsaufwand verbunden ist, da die für die Überlagerung nötigen Daten der Anwendung bereits vorliegen. Mit den bereits vorliegenden Daten sind die Positionen aller Objekte gemeint, welche die Kamera relativ zu ihrer Position berechnet hat. Die einzig ausstehende Berechnung ist das Ausrichtungsverhältnis der Augmentierung mit dem 2D Aufnahmebild, damit die Augmentierung an der korrekten Position angezeigt werden kann. Eine solche Berechnung wird beispielsweise mit ARCore durchgeführt. ARCore ist ein Software Development Kit zur Erstellung von AR-Anwendungen mit dem Fokus auf Android Geräten²³. Nachteil dieser Anzeigetechnologie ist, dass der Umgang mit der abgebildeten Welt unnatürlich erscheint, da eine Diskrepanz zwischen der Sicht der Kamera und somit dem angezeigten Bild und der echten Sicht des Anwenders entsteht²⁴. Diese Parallaxe entstehen durch die unterschiedliche Ausrichtung beziehungsweise Positionierung der Kamera und der Augenposition des Anwenders²⁵. In Abbildung 7 ist der Parallaxeffekt gut nachzuvollziehen. Die Augen haben eine höhere Ausrichtung als die Kamera des Smartphones.



Abbildung 7: ARenaXperience Indoor Navigation App - Mercedes-Benz AG

(Quelle: Eigene)

²² R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre (2001) S. 35

²³ Google AR & VR (2020)

²⁴ Kato und Billinghurst (1999) S. 4

²⁵ Mardanbegi und Hansen (2012) S. 689

Neben der video see-through Technologie gibt es weitere Technologien zur Anzeige von Augmentierungen. Die optical see-through Technologie ermöglicht dem Anwender die echte Welt in direkter Form zu betrachten. Ein wesentlicher Unterschied der Technologien besteht darin, dass keine Aufnahme der Umwelt angezeigt wird, sondern die echte Welt durch einen transparenten Bildschirm wahrgenommen werden kann. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass keine Diskrepanz zwischen der Sicht des Anwenders und der Kamera entstehen kann, wie bei video see-through Bildschirmen, da die echte Welt nicht von einer Kamera aufgenommen werden muss. Allerdings erfordert diese Art der Darstellung für eine lagerichtige Okklusion zusätzlich zu den Daten, die bei einer video-see-through Technologie notwendig sind, das Ausrichtungsverhältnis zwischen Kamera, Bildschirm und den Augen des Anwenders²⁶. Grund dafür ist, dass die erzeugte Augmentierung lagerichtig im Sichtfeld des Anwenders angezeigt werden muss. Im Gegensatz zu video-see-through, muss jedoch nicht nur aus der Sicht der Kamera eine 2D Aufnahme mit einem 3D Objekt überlagert werden, sondern ein 3D Objekt in das Sichtfeld des Nutzers abgebildet werden. Von daher ist es notwendig den Versatz der Kamerapositionierung zu den Augen des Anwenders und die Entfernung zwischen Bildschirm und Augen zu berücksichtigen. Eine Veranschaulichung des soeben beschriebenen Versatzes ist in Abbildung 8 am Beispiel der Microsoft HoloLens 2 gezeigt.

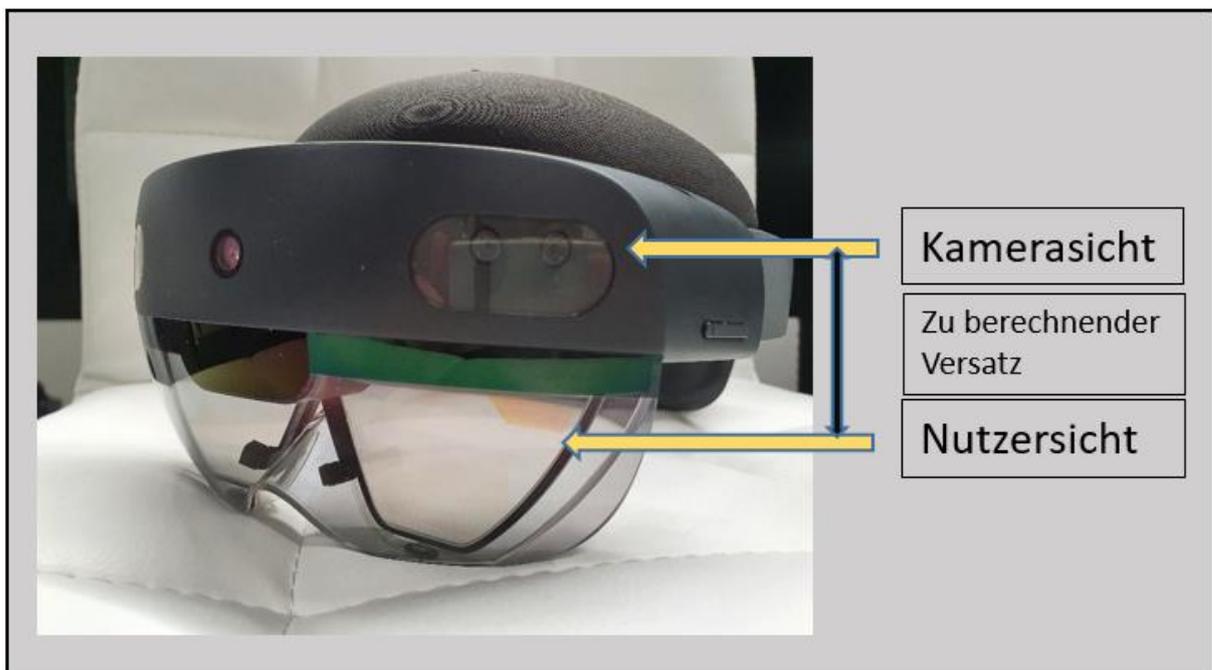


Abbildung 8: HoloLens2 Veranschaulichung der Ausgangssichten

(Quelle: Eigene)

Neben der Darstellung von Augmentierung mit Bildschirmen gibt es noch eine weitere Möglichkeit diese sichtbar zu machen: Die Projektion. Durch einen Projektor können physische

²⁶ Kato und Billinghurst (1999) S. 4

Gegenstände direkt bestrahlt werden, was dem Anwender ermöglicht, die Überlagerungen direkt am physischen Objekt zu betrachten. Ein großer Vorteil von Projektoren ist, dass keine AR Brille oder mobiles AR Gerät getragen werden muss, um die Augmentierung zu sehen. Jedoch muss ein Projektor zunächst aufgebaut und ausgerichtet werden und erfordert daher eine Vorbereitung. In Abbildung 9 ist ein solcher Versuch abgebildet, der in Kapitel 2.4.1 genauer beschrieben wird. Neben Projektoren, die physische Objekte direkt bestrahlen, können Projektoren auch im übertragenen Sinne als video see-through Medium betrachtet werden, sofern die Projektion auf einer Leinwand abgebildet wird. Grundsätzlich verwenden die im Folgenden vorzustellenden AR-Medien entweder eine optical see-through Technologie oder eine video see-through Technologie.

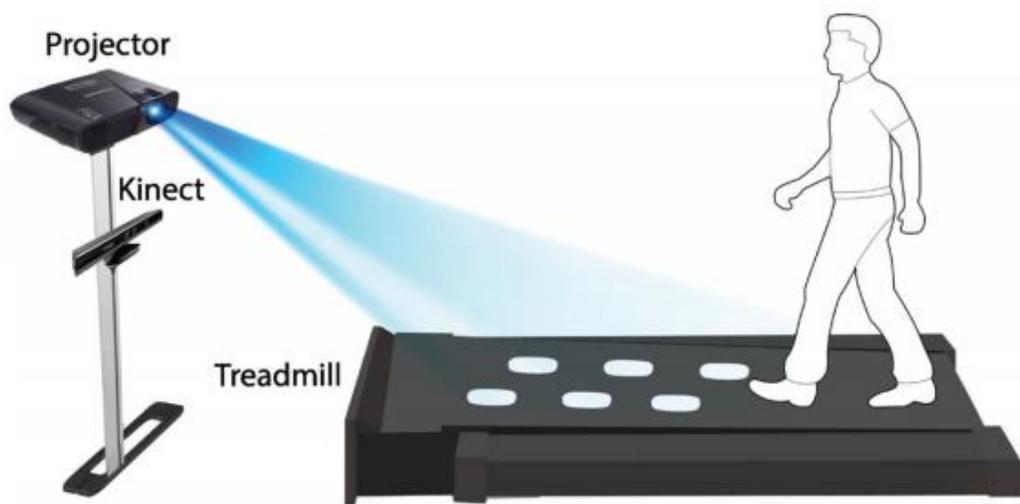


Abbildung 9: Rehabilitationsversuch mit AR Projektor

(Quelle: Sekhavat und Namani, 2018)

2.2.1 Head Mounted Displays

Head Mounted Displays bezeichnen Bildschirme, die mithilfe einer Vorrichtung am Kopf oder Helm des Anwenders befestigt werden können. Wesentlicher Vorteil eines HMDs ist somit die Tatsache, dass während der Betrachtung der augmentierten Welt die Hände für andere Tätigkeiten frei bleiben. Dies kann beispielsweise durch einen Gurt erreicht werden oder im Falle sehr leichter Geräte können diese wie eine gewöhnliche Brille aufgesetzt werden. Leistungsstarke Brillen wie beispielsweise die Microsoft HoloLens 2 sind in der Lage anspruchsvolle 3D Überlagerungen in Echtzeit lagerichtig darzustellen. Möglicher Nachteil solcher Brillen ist jedoch das Gesamtgewicht. Des Weiteren können AR-Brillen aufgrund der Positionierung des Bildschirms, das Sichtfeld des Anwenders einschränken. Jedoch gibt es auch AR-Brillen, die das Sichtfeld weniger einschränken. Ein Beispiel für eine solche AR-Brille

ist die Vuzix Blade²⁷. Die Vuzix Blade kann wie eine Brille aufgesetzt werden und besitzt innerhalb der Brillengläser nur einen kleinen Bildschirm im rechten Brillenglas. Das Sichtfeld wird somit weniger eingeschränkt. Häufig geht mit sinkendem Gesamtgewicht aber ein Leistungsverlust einher, weshalb verschiedene Brillentypen für unterschiedliche Anwendungsgebiete vorgesehen sind. Eine Zwischenlösung neben einigen anderen Modellen ist die nReal²⁸. Die nReal ist ebenfalls eine sehr leichte AR-Brille, besitzt aber verglichen mit der Vuzix Blade eine bessere Leistung, da die Recheneinheit der AR-Brille nicht in der Brille selbst verbaut ist, sondern via Kabel in eine Tasche gesteckt oder an einem Gürtel befestigt werden kann. Je nach Anwendungsbereich könnte ein Kabel zwischen Brille und Recheneinheit aber als einschränkend empfunden werden, weshalb die Vor- und Nachteile jeder Brille auf den Anwendungsfall abgestimmt werden sollten. Eine 3D Überlagerung wie sie mit der Microsoft HoloLens 2 möglich ist, kann mit der Vuzix Blade nicht im selben Umfang erreicht werden. Jedoch besteht das Haupteinsatzgebiet solcher AR Brillen eher darin Text- und 2D Bildinformationen anzuzeigen. Generell finden HMDs Anwendung in Bereichen, in denen der Vorteil, beide Hände zur Verfügung zu haben, gegenüber der Einschränkung der Bewegungsfähigkeit und gegebenenfalls Sicht überwiegt. Dies könnte zum Beispiel im Bereich der Instandhaltung der Fall sein, da für Inspektionen diverse Hilfsmittel verwendet werden müssen. Da das HMD immer der Bewegung des Kopfes folgt, muss der Bildschirm nicht umpositioniert oder gehalten werden²⁹. Jedoch geht damit einher, dass der Bildschirm nicht auf die Schnelle entfernt werden kann, ohne die AR-Brille abzusetzen.

2.2.2 Handheld Displays

Handheld Displays sind Geräte, die durch video see-through-Bildschirme in der Lage sind Augmentierungen anzuzeigen. Der große Vorteil von Handheld Displays ist die Tatsache, dass sie auf mobilen Geräten wie Smartphones und Tablets Anwendung finden, die aufgrund ihrer Größe und des geringen Gewichts leicht mitführbar und somit nahezu immer zur Verfügung stehen. Ein Beispiel für ein Handheld Display ist in Abbildung 11 zu sehen. Des Weiteren ermöglicht der technische Fortschritt im Bereich von Mobile Computing die stetige Verbesserung und Entwicklung von neuen und potenteren mobilen AR Applikationen³⁰. Ebenfalls vorteilhaft ist die soziale Akzeptanz kleiner mobiler Geräte, die bereits im frühen einundzwanzigsten Jahrhundert bestand³¹. Mobiltelefone oder heutzutage Smartphones prägen bereits seit vielen Jahren unseren Alltag, ob als Kommunikationsgerät, Zeitvertreib, Nachrichtenportal oder Kamera im Urlaub und stellen somit ein Gerät dar, was zu jeder

²⁷ Vuzix (2021)

²⁸ Nreal (2020)

²⁹ Koulieris et al. (2019) S. 1

³⁰ Bottani und Vignali (2019) S. 284

³¹ Wagner und Schmalstieg (2003) S. 1

Tageszeit mitgeführt wird. Daher ist es nicht verwunderlich, dass bereits seit einiger Zeit das eigene Smartphone als AR-Medium genutzt werden kann. Ebenfalls vorteilhaft sind die geringen Produktionskosten und der einfache Umgang mit den Geräten, weshalb Handheld Devices als AR Medium ein großes Potential im Massenmarkt mit sich bringen³². Im Vergleich dazu erscheint das Mitführen eines nur für AR-Anwendungen vorgesehenen Gerätes wie der AR-Brille umständlich. Vergleichbar wäre heutzutage das Mitführen eines MP3-Players, obwohl die Musikwiedergabe auch mit dem Smartphone möglich ist.

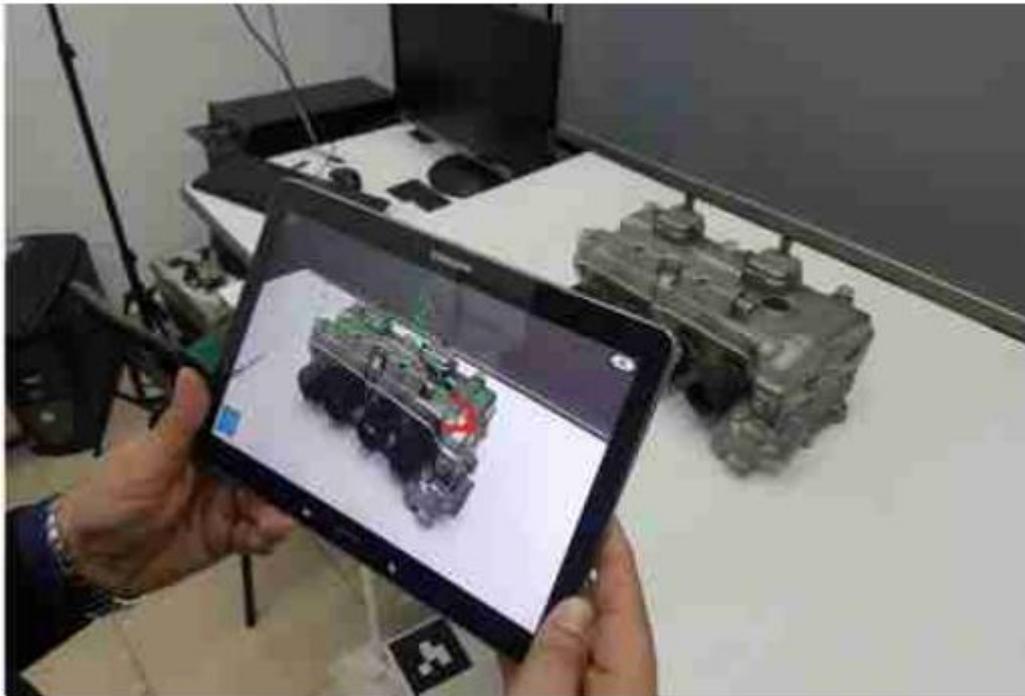


Abbildung 10: Beispiel eines Handheld Displays aus dem Versuch von Masoni et al.

(Quelle: Masoni et al., 2017)

2.2.3 Head-down und Head-up Displays

Head-down Displays sind Bildschirme, die ein Anwender nur betrachten kann, wenn der Kopf geneigt und somit das eigene Sichtfeld gesenkt wird. Ein typisches Beispiel für ein Head-down Display ist das klassische Navigationssystem in einem Auto, welches oft mittig im Bereich der Konsole angebracht ist³³. In neueren Autos sind bereits Head-up Displays zu finden, welche sich in der Windschutzscheibe befinden. Durch AR kann der Fahrer während der Navigation Richtungsweiser erkennen, die direkt auf die Windschutzscheibe und somit für den Fahrer wie auf die Straße projiziert wirken. In Abbildung 12 sind Beispiele für Head-up Displays und Head-down Displays der Mercedes-Benz AG zu sehen. Links in Abbildung 11 ist ein in die

³² van Krevelen und Poelman (2010) S. 5

³³ Liu und Wen (2004) S. 680

Windschutzscheibe integriertes Head-up Display zu sehen, welches neben der Navigation auch weitere Informationen wie Geschwindigkeit, Uhrzeit, Geschwindigkeitsbegrenzung und mehr anzeigt. Rechts ist ein Head-down Display zu sehen, welches in ähnlicher Form seit einigen Jahren in neueren Automodellen verbaut wird.

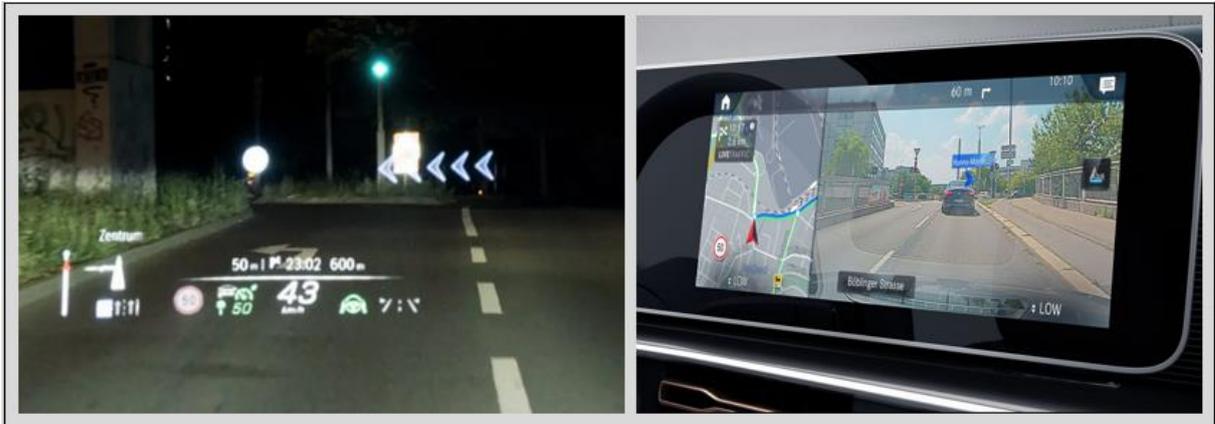


Abbildung 11: Links: Mercedes-Benz AR Navigation - Rechts: Mercedes-Benz Head-up AR Navigation

(Quelle: Anderson, 2020; Mercedes-Benz EQC: MBUX Augmented Reality Für Navigation, 2021)

2.2.4 AR mit Projektionen

AR-Projektoren sind in der Lage, Augmentierungen am echten Objekt anzuzeigen oder mithilfe von video see-through die augmentierte Sicht auf einer Leinwand auszugeben. AR-Projektoren haben wie auch HMD den Vorteil, dass der Anwender beide Hände für andere Tätigkeiten zur Verfügung hat. Allerdings müssen sie zunächst aufgebaut und je nach Anwendungsfall kalibriert werden³⁴. Sowohl mobile als auch statische AR-Projektoren sind möglich.

Ein Anwendungsfall von AR Projektoren wird von Gurevich et al.³⁵ vorgestellt. In dieser Arbeit wurde ein AR Projektor als Fernunterstützung eingesetzt, um einem Arbeiter bei einer Instandhaltungsmaßnahme zu unterstützen. AR Lösungen mit Projektionen benötigen aber selbstverständlich eine Art von Projektor, der zunächst zum jeweiligen Arbeitsplatz transportiert und installiert werden muss, um die Augmentationen an echten Objekten anzuzeigen. Vorteil eines Projektors besteht darin, dass der Arbeiter kein HMD oder Handheld Display bedienen muss, um spezifische Anweisungen zu erhalten, da die Steuerung des Projektors vom Fernunterstützer übernommen werden kann. Der Projektor, der in der Versuchsreihe von Gurevich et al. verwendet wird, ist in Abbildung 13 gezeigt.

³⁴ Heinsohn (2020)

³⁵ Gurevich et al. (2015)



Abbildung 12: AR Projektor aus dem Versuch von Gurevich et al.

(Quelle: Gurevich et al., 2015)

Des Weiteren ist die Augmentation nicht mehr an die Größe eines Bildschirms gebunden³⁶. Ein weiterer Vorteil eines Projektors besteht darin, dass der Fernunterstützer nicht an die Sicht des Arbeiters gebunden ist, da dieser den Arbeitsplatz anhand der Kamera im Projektor betrachten kann und somit ein wackelfreies Sichtfeld beibehalten kann. Das Sichtfeld kann der Fernunterstützer nach Belieben feinjustieren, da der Projektor auf einem Roboterarm befestigt ist. Der Arbeiter kann Anmerkungen in visueller Form direkt auf dem Arbeitsplatz wahrnehmen ohne einen Bildschirm vor sich zu haben und wird zusätzlich durch auditive Anweisungen unterstützt³⁷. In Abbildung 12 ist eine Veranschaulichung des Versuchs von Gurevich et al. zu sehen. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Sicht des Fernunterstützers zu sehen, der anhand einer Benutzeroberfläche Markierungen in Form von Pfeilen und Kreisen einzeichnen kann, welche dann vom Projektor auf den Arbeitsbereich projiziert werden. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein Arbeiter zu sehen, der anhand der projizierten Anweisungen eine Wartungsarbeit durchführt.

³⁶ Bimber und Raskar (2005) S. 213

³⁷ Gurevich et al. (2015) S. 29



Abbildung 13: TeleAdvisor Links: Fernunterstützer - Rechts: Arbeiter

(Quelle: Gurevich et al., 2015)

2.3 Funktionsweise von Augmented Reality

Eine der wichtigsten Grundlagen von AR ist die Bestimmung der relativen Position und Ausrichtung der Kamera in Echtzeit, dessen Bestimmung im Folgenden als Tracking bezeichnet wird³⁸. Tracking ist zwingend notwendig, um die Sicht des Anwenders und die Sicht der Kamera korrekt zu berechnen und AR Elemente an den richtigen Positionen abzubilden³⁹. Berechnet werden je nach Trackingtechnologie bis zu 6 Variablen: X, Y und Z für die Position im Raum und die Roll-Nick-Gier Winkel für die Ausrichtung⁴⁰. Unabhängig von der Art des Trackings ist aber immer eine Form von Anhaltspunkt in der echten Welt notwendig, um die Position und Ausrichtung der Sicht des Anwenders im Verhältnis zum Anhaltspunkt zu bestimmen⁴¹. Dieser Anhaltspunkt kann je nach Trackingart und Anwendungsfall ein physisches Objekt sein, wie beispielsweise ein aus Papier gefertigter QR-Code, auch als Marker bezeichnet oder auch eine bestimmte Position im Raum, die als GPS Koordinate ausgegeben und empfangen wird⁴². Auch Radiowellen oder Magnetfelder können für das Tracking verwendet werden⁴³.

Grundsätzlich beeinflusst die Stabilität und Robustheit des Trackings die Erfahrung des Nutzers und somit die Performanz des AR Systems enorm, da zum Beispiel durch Zittern oder Flimmern der Überlagerungen Fehler entstehen können oder das Wohlbefinden der Anwender negativ beeinflusst werden könnte⁴⁴. Das Wort „Tracking“ wird auch im Kontext von Eye-Tracking, Hand-Tracking, Magnet-Tracking, Akustisches-Tracking und vielen weiteren

³⁸ van Krevelen und Poelman (2010) S. 6

³⁹ Koulteris et al. (2019) S. 11

⁴⁰ Genc et al. (2002) S. 2

⁴¹ Billinghamurst et al. (2015) S. 103

⁴² Billinghamurst et al. (2015) S. 103

⁴³ van Krevelen und Poelman (2010) S. 7

⁴⁴ Wang et al. (2018) S. 2342f

verwendet, wobei letztere Beispiele für bestimmte Arten und Weisen des Trackings stehen und erstere wiederum Beispiele für ein zu trackendes Objekt beziehungsweise Körperteil stehen. Hervorzuheben ist, dass es nicht die eine und beste Technologie gibt, sondern viel eher bestimmte Technologien für spezifische Anwendungsfälle von Vorteil sind und umgekehrt⁴⁵. Zu den Faktoren, die gegeneinander abzuschätzen sind, gehören unter anderem die Genauigkeit des Trackings, die Latenz, Robustheit und viele weitere, welche unter anderem durch den Anwendungsfall erschwert oder erleichtert sein können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus nur auf optisches Tracking gerichtet, welches in den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.4 vorgestellten AR Technologien angewendet wird. Optisches Tracking wird durch optische Sensoren wie Kameras ermöglicht, welche alle auf Basis von Bilderkennung und Bildverarbeitung der laufend aufgenommenen Umgebung durchgeführt wird⁴⁶.

Zunächst einmal ist zu unterscheiden, ob das angewandte Trackingsystem Vorkenntnisse über die Umgebung besitzt oder nicht. Beispiele für Tracking in bekannten Umgebungen sind Marker- und Model-based Tracking. Diese Trackingtechnologien basieren darauf Marker wie in Abbildung 15 gezeigt oder Modelle wie Computer Aided Design-Modelle (im Folgenden CAD) in der Umgebung zu erkennen und diese als Referenzpunkte für das Tracking zu nutzen⁴⁷. Marker sind Bilder, die von der Kamera des AR-Geräts eingelesen werden können und Informationen über die Umgebung liefern. Sie sind in der Regel schwarz-weiß, da starke Kontraste die Erkennung vereinfachen⁴⁸. An den Positionen, wo die Marker angebracht wurden, können dann Überlagerungen angezeigt werden oder relativ zu den Positionen der Marker Augmentierungen ausgegeben werden.

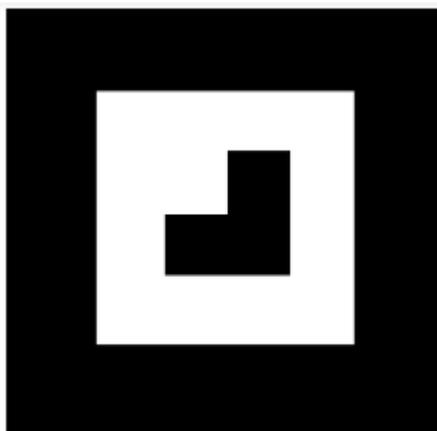


Abbildung 14: Schwarz-weißer 2D Marker

(Quelle: Katiyar et al., 2015)

⁴⁵ Welch und Foxlin (2002) S. 25

⁴⁶ Koulieris et al. (2019) S. 13

⁴⁷ Lima et al. (2010) S. 6

⁴⁸ Katiyar et al. (2015) S. 442

Allerdings ist für Marker-based Tracking nur eine Vorbereitung der Umgebung notwendig, da die Marker zunächst im direkten Umfeld angebracht werden müssen. Am Arbeitsplatz kann dies als störend und mühsam empfunden werden, da diese zunächst angebracht werden müssen und während der Arbeitsschritte weder beschädigt noch verdeckt werden dürfen⁴⁹. Da Beschädigungen der Marker zu Fehlern führen können, bedürfen sie außerdem einer regelmäßigen Wartung⁵⁰. Eine Verdeckung der Marker führt außerdem dazu, dass diese nicht mehr getrackt und von daher keine Augmentierung mehr angezeigt werden kann⁵¹. Vorteile solcher Marker bestehen darin, dass sie eine robuste Überlagerung ermöglichen und aufgrund ihrer Einfachheit mit einem niedrigen Rechenaufwand verbunden sind⁵². Außerdem ist Marker-based Tracking robust gegenüber Veränderungen der Umgebung. Solange die Marker sichtbar und somit trackbar bleiben, kann eine Überlagerung angezeigt werden.

Im Gegensatz zu Marker-based Tracking bedarf Model-Based Tracking keiner physischen Marker mehr, die in der Umgebung angebracht werden müssen. Daraus folgt, dass die mit der Anbringung und Sichtbarkeit der Marker verbundenen Nachteile von Marker-Based Tracking entfallen. Ein weiterer Vorteil von Model-Based Tracking besteht darin, dass das Tracking robust gegenüber teilweiser Überdeckung und Rotationen ist. Das eingespeicherte CAD-Modell kann also teilweise von anderen Bauteilen verdeckt sein und trotzdem erkennbar bleiben⁵³. Jedoch ist es notwendig die zu erkennenden 3D Modelle von Objekten in Form von CAD-Modellen vorab im System persistent zu hinterlegen⁵⁴. Model-Based Tracking wird beispielsweise anhand von Kantentracking durchgeführt, wobei ein Gitternetz des 3D Modells mit dem Objekt in der echten Welt überlagert wird. Diese Form des Model-Based Trackings eignet sich für Objekte mit deutlichen polygonalen Konturen.

Tracking ohne Vorkenntnisse, also in Umgebungen in denen keine bereits bekannten Merkmale wie Marker oder Modelle existieren, ist ebenfalls möglich. Ein Beispiel hierfür ist der SLAM- (Simultaneous Localisation And Mapping) Ansatz. Die Idee des SLAM-Ansatzes kommt aus der Robotik und besteht in der gleichzeitigen Erstellung einer Karte der Umwelt und der Schätzung der Entfernung des Anwenders oder Roboters zu der aktuellen Position⁵⁵. Der SLAM-Ansatz kann eingesetzt werden, wenn sich der Anwender in einer unbekanntem Umgebung befindet, welche dann schrittweise kartiert wird. Die entstandene Karte kann dann für die Bestimmung von Pfaden oder Visualisierungen verwendet werden. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass vorab weder Marker noch Modelle platziert, beziehungsweise eingespeichert werden müssen. Jedoch benötigt die Erstellung einer Karte auf Basis des

⁴⁹ Lima et al. (2010) S. 1

⁵⁰ Genc et al. (2002) S. 2

⁵¹ Palmarini et al. (2018) S. 16

⁵² Genc et al. (2002) S. 2

⁵³ Palmarini et al. (2018) S. 16

⁵⁴ Lima et al. (2010) S. 6

⁵⁵ Cadena et al. (2016) S. 1309

SLAM-Ansatzes einen hohen Rechenaufwand, der nicht von jedem mobilen und AR-fähigen Gerät gegeben ist⁵⁶. Des Weiteren muss die Karte neu erstellt werden sobald hinreichend große Änderung der Umgebung stattfinden.

Nach den Untersuchungen von Palmarini et al. werden Trackingtechnologien ohne Vorkenntnisse über die Umgebung wie SLAM nur 10% der untersuchten Forschungen verwendet, was im Umkehrschluss bedeutet, dass 90% der angewandten Trackingtechnologien Tracking mit Vorkenntnissen umfasst⁵⁷.

Nachteile aller optischen Tracking Methoden besteht darin, dass die Umgebung nicht zu schlecht beleuchtet sein darf, da sonst weder Marker noch 3D Modelle oder generell die Umwelt erkannt werden können. Dennoch kann auch ein zu helles Arbeitsumfeld problematisch sein. Zwar ist das Tracking in hellen Umgebungen besser möglich, da beispielsweise Marker oder Modelle leichter erkannt werden können, jedoch stellen helle Umgebungen eine Herausforderung an die Sichtbarkeit der Augmentierung dar, da der Kontrast zwischen Anzeige und Umgebung geringer wird. Ein weiterer Nachteil von optischem Tracking besteht in der Tatsache, dass durch reflektierende und spiegelnde Oberflächen Trackingungenauigkeiten entstehen können, die zu Fehlern in der Überlagerung oder sogar dazu führen, dass Modelle oder Marker nicht oder nur verzögert erkannt werden⁵⁸.

2.4 Augmented Reality im Einsatz

In diesem Kapitel werden aktuelle Anwendungen von Augmented Reality in den Bereichen Medizin, Produktion, Instandhaltung und Wartung erläutert, indem aktuelle Studien referenziert werden. Anhand der Studien wird neben dem Status Quo aufgezeigt, aus welchen Gründen sich Augmented Reality für die in Kapitel 1.1 beschriebene Problematik eignet. Abschließend werden Anwendungsbereiche in der Daimler AG erläutert.

2.4.1 AR im medizinischen Bereich

Ein Forschungsgebiet von AR im medizinischen Bereich ist das Anzeigen operationsrelevanter Daten als Überlagerung und die Abbildung von Kameraaufnahmen von Geräten oder Robotern, die während der Operation verwendet werden. Durch die Integration von AR Technologien in den Operationsprozess konnten bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt werden⁵⁹. Die Betrachtung von Anwendungsgebieten von AR im medizinischen Bereich ist deshalb sinnvoll, da sich die verwendeten Konzepte und Ansätze durchaus auch auf den Bereich der Instandhaltung und Wartung übertragen lassen können. Somit könnten

⁵⁶ Polvi et al. (2016) S. 1

⁵⁷ Palmarini et al. (2018) S. 16

⁵⁸ Heinsohn (2020)

⁵⁹ Carmigniani et al. (2011) S. 365

Forschungsergebnisse durchaus hilfreich sein, um ein geeignetes Konzept für die Endkontrolle von Kurbelgehäusen zu entwickeln.

Bichlmeier et al. stellen eine AR Lösung vor, die in der Lage ist, 3D Visualisierungen abhängig von der Anatomie des Patienten in Echtzeit abzubilden⁶⁰. Für die Versuchsreihe wird ein video see-through HMD verwendet, welches eine 3D Überlagerung der Anatomie über das im Fokus stehende Areal des Patienten legt⁶¹. Des Weiteren konnten Aufnahmen eines Endoskops, welche klassisch auf einem separaten Bildschirm abgebildet werden, direkt auf einer AR Brille angezeigt werden. Ergebnisse der Versuchsreihe zeigten, dass die Navigation des Endoskops verbessert werden konnte, da die visuelle Darstellung der Position des Endoskops und das Tiefenverständnis intuitiver gestaltet werden konnten⁶².



Abbildung 15: 3D Überlagerung der Anatomie

(Quelle: Bichlmeier et al., 2007)

Ein weiteres Einsatzgebiet von AR im medizinischen Bereich ist die Unterstützung von Übungs- und Lehrmaßnahmen, mit denen sonst lebensgefährliche Situation simuliert und geübt werden können⁶³. Barsom et al. stellen einige AR Anwendungen vor, die für Übungs- und Lehrmaßnahmen verwendet werden⁶⁴. Durch den Einsatz solcher AR Anwendungen konnte, das Selbstbewusstsein, die technische Fähigkeit und das Wissen gesteigert werden^{65 66}.

Ein weiterer Anwendungsbereich ist der Einsatz von AR im Bereich der Rehabilitation. Bur et al. stellen in ihrer Arbeit einige Spiele vor, die für die Rehabilitation von Schlaganfallgeschädigten Patienten eingesetzt werden können⁶⁷. Grund für eine spielerische Gestaltung

⁶⁰ Bichlmeier et al. (2007) S. 1ff

⁶¹ Bichlmeier et al. (2007) S. 1

⁶² Bichlmeier et al. (2007) S. 8

⁶³ Barsom et al. (2016) S. 4174

⁶⁴ Barsom et al. (2016) S. 4174ff

⁶⁵ Zeng et al. (2010) S. 775

⁶⁶ Fernandez et al. (2012) S. 245

⁶⁷ Bur et al. (2010 - 2010) S. 75ff

im Gegensatz zur klassischen Rehabilitation sind bekannte positive Faktoren von Spielen, wie Stimulation, Begeisterung und Unterhaltung⁶⁸.

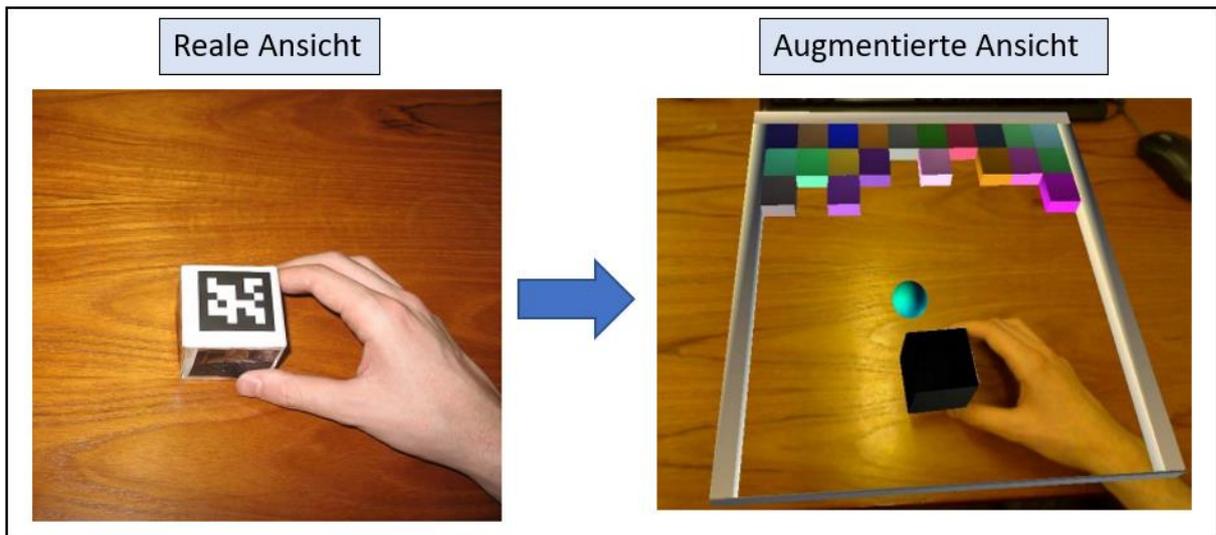


Abbildung 16: AR Spiel *Brick 'a' Break*

(Quelle: But et al., 2010)

Das Spiel *Brick'a'Break* wurde von Bur et al. in Anlehnung an das Spiel *Breakout* von Atari entwickelt. Das Spiel basiert auf einem video see-through Bildschirm, der an einen Computer angeschlossen ist. Die Aufnahme der Umgebung und das Erfassen der Position des Interaktionsgegenstandes wird durch eine Webcam durchgeführt. Durch einen Marker erkennt die Webcam den Gegenstand und ist in der Lage dessen Position zu bestimmen, wie auf der linken Seite von Abbildung 16 zu sehen ist. Sobald der Gegenstand mit virtuellen Würfeln kollidiert, werden diese zerstört und der Spieler erhält Punkte. Ziel des Spiels ist das spielerische Trainieren von Greif- und Streckbewegungen der Hand beziehungsweise des Arms⁶⁹.

In 2018 veröffentlichten Sekhavat und Namani eine Versuchsreihe, in der Testpersonen typische Übungen im Rahmen einer Rehabilitation mit AR Projektoren durchführten⁷⁰. Verglichen wurden hierbei zwei Ansätze. In Ansatz A wurde ein Bildschirm verwendet, um die Bewegungen für die Rehabilitation anzuzeigen, wie in Abbildung 18 gezeigt ist. Die Bewegungsanweisungen wurden auf einem Monitor auf Augenhöhe des Patienten angezeigt und dann auf einem Laufband nachgeahmt.

⁶⁸ Bur et al. (2010 - 2010) S. 75

⁶⁹ Bur et al. (2010) S. 76f

⁷⁰ Sekhavat und Namani (2018)

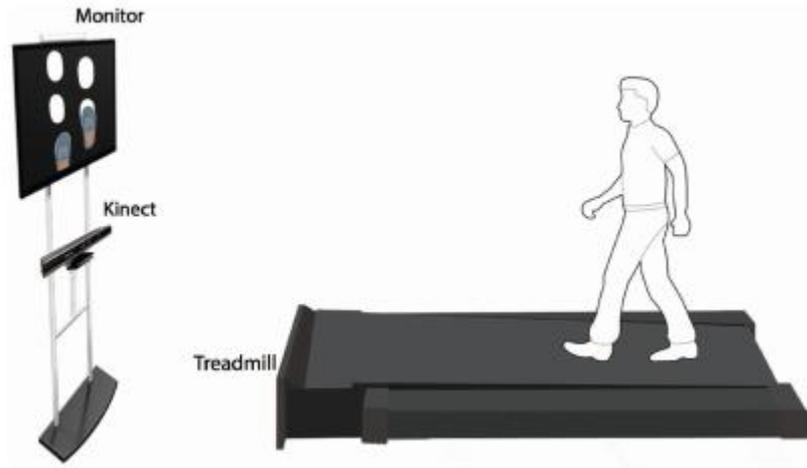


Abbildung 17: Versuch von Sekhvat und Namani auf Monitorbasis

(Quelle: Sekhvat und Namani, 2018)

In Ansatz B wurde statt eines Monitors ein AR Projektor verwendet, der durch eine Projektion auf das Laufband die Bewegungsanweisung visuell abgebildet. Ansatz B ist in Abbildung 19 zu sehen. In beiden Fällen wurde die Bewegung der Testpersonen durch Microsoft Kinect⁷¹ gemessen, bei welchem es sich um einen Sensor zur Messung von Bewegung darstellt.

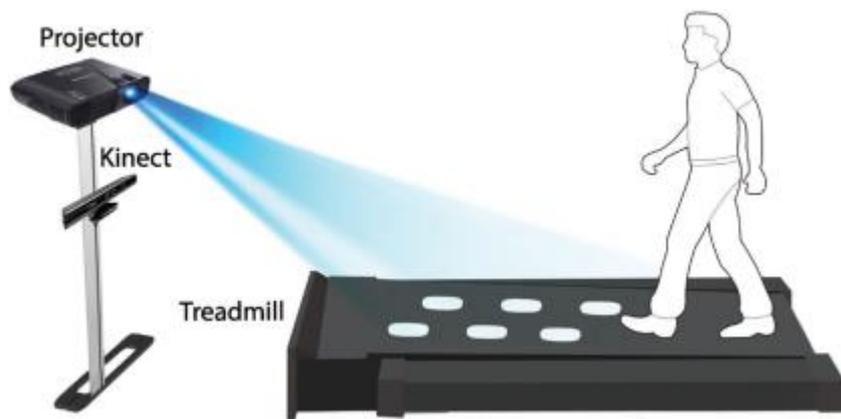


Abbildung 18: Versuch von Sekhvat und Namani auf Projektorbasis

(Quelle: Sekhvat und Namani, 2018)

Probleme in Ansatz A bestanden darin, dass eine Diskrepanz zwischen dem Bereich, wo die Bewegung tatsächlich stattfindet und der Anzeige vorliegt. Diese führt zu Missverständnissen und Schwierigkeiten bei der korrekten Durchführung der Rehabilitation. Jedoch bestand der Vorteil darin, dass der Blick des Patienten nach vorne gerichtet sein konnte und von daher eine natürliche Haltung angenommen werden konnte.

⁷¹ Microsoft Kinect (2020)

Probleme in Ansatz B bestanden darin, dass die Blickrichtung auf das Laufband gerichtet sein muss, um den Anweisungen zu folgen. Des Weiteren könnten durch die Okklusion zwischen Augmentierung und Fuß Missverständnisse darüber entstehen, ob die Bewegung korrekt ausgeführt wurde. Vorteilhaft ist aber das Wegfallen der in Ansatz A beschriebenen Diskrepanz, da die Bewegungsanweisungen direkt auf dem Laufband angezeigt werden können. In Abbildung 20 ist das Okklusionsvermeidungssystem von Sekhavat und Namani abgebildet. Links ist eine Okklusion zwischen Fuß und Augmentierungen zu sehen, welches rechts durch das Okklusionsvermeidungssystem vorgebeugt wird.



Abbildung 19: Okklusionsvermeidungsansatz

(Quelle: Sekhavat und Namani, 2018)

Die Versuchsreihe wurde sowohl mit gesunden als auch mit erkrankten Personen durchgeführt, welche wiederum in zwei Gruppen aufgeteilt wurden. Getestet wurden neben der Schrittgeschwindigkeitsübung, welche in Abbildung 19 abgebildet ist, noch eine Hindernisüberwindungsübung mit wechselnder Geschwindigkeit, welche in Abbildung 20 gezeigt ist.

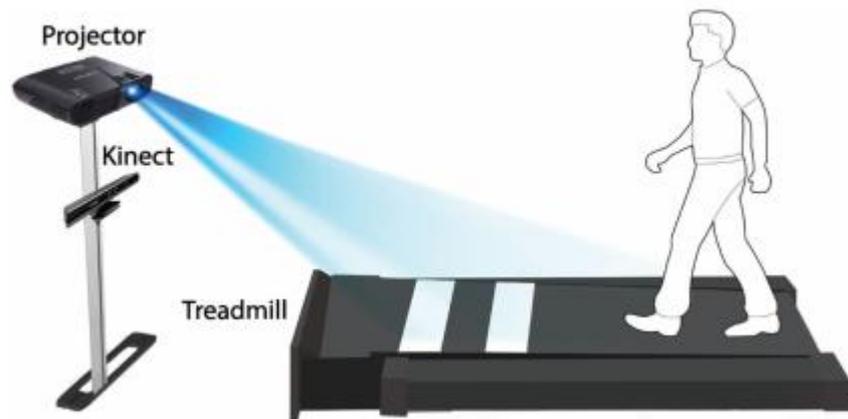


Abbildung 20: Hindernisvermeidungsversuch von Sekhavat und Namani

(Quelle: Sekhavat und Namani, 2018)

In der Schrittgeschwindigkeitsübung konnte gemessen werden, dass die Testpersonen schneller auf wechselnde Geschwindigkeiten reagierten, wenn sie als Augmentierung angezeigt wurden. Nach einer Auswertung konnte ein signifikanter Unterschied in der Anzahl an Schritten zur Anpassung an wechselnde Geschwindigkeiten gemessen werden, welche untermauert, dass projizierte Anweisungen vorteilhafter und besser umsetzbar sind als das Anzeigen auf einem Bildschirm. Auch im Hindernisvermeidungsversuch konnte ein signifikanter Unterschied zwischen projizierten Anweisungen und Bildschirmanzeigen gemessen werden. Die Testpersonen konnten sich schneller an wechselnde Geschwindigkeiten während der Vermeidung von Hindernissen anpassen. Des Weiteren wurde anhand eines Fragebogens die Qualität der Erfahrung und der Grad der Intuitivität gemessen. Es konnte auch hier ein signifikanter Unterschied in der Erfahrung der Testpersonen gemessen werden, wobei die Erfahrung mit projizierten Anweisungen als positiver beziehungsweise intuitiver bewertet wurde. Im Anschluss an die Versuchsreihe mit den gesunden Personen wurde ein Probeversuch mit echten Patienten durchgeführt. Auch in dieser Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass die Patienten schneller auf wechselnde Geschwindigkeiten reagierten, sofern die Anweisungen als Projektionen abgebildet wurden.

2.4.2 AR in der Produktion, Instandhaltung und Wartung

Gerade im Bereich der Instandhaltung und Wartung, welche vergleichbar mit der Qualitätskontrolle ist, da in beiden Fällen Prüfobjekte auf ihre Qualität beziehungsweise Funktionsfähigkeit getestet werden, stellen AR Lösungen eine vielversprechende Lösung dar. In der Literatur sind einige Zeitungsartikel veröffentlicht, die Forschungsergebnisse aus dem Bereich der Produktion, Instandhaltung und Wartung präsentieren.

De Marchi et al. beschreiben in ihrer Arbeit, dass AR eine mögliche Ergänzung in all jenen Bereichen sein kann, in denen aktuell lediglich visuelle Inspektionen eingesetzt werden, um Probleme festzustellen⁷². Ein Beispielfall ist die Gebäudewartung, in welcher anhand der Spaltmaße von Rissen im Fundament, beziehungsweise der Wände und Decken von Gebäuden, deren Zustand bestimmt wird. Dies kann problematisch sein, da beispielsweise Risse übersehen werden könnten. Hinzu kommt, dass die Einschätzung über die Beschädigung auf der Erfahrung und subjektiven Einschätzung des Kontrolleurs beruhen⁷³. Durch die Ergänzung von AR in Wartungs- und Qualitätskontrollen könnten durch visuelle Repräsentationen auf Basis der registrierten Umwelt zusätzliche Informationen geliefert werden, die den Kontrollprozess maßgeblich unterstützen und vereinfachen könnten.

In einem Experiment visualisieren Marchi et al. mithilfe einer AR Brille die Einschlagposition und Aufprallstärke eines Hammers auf einer Fläche, um zu zeigen, inwiefern der Aufprall den Gegenstand beschädigen könnte und, dass Augmentierungen in Echtzeit ein sinnvolles Hilfsmittel bei der Instandhaltung und Wartung darstellen.

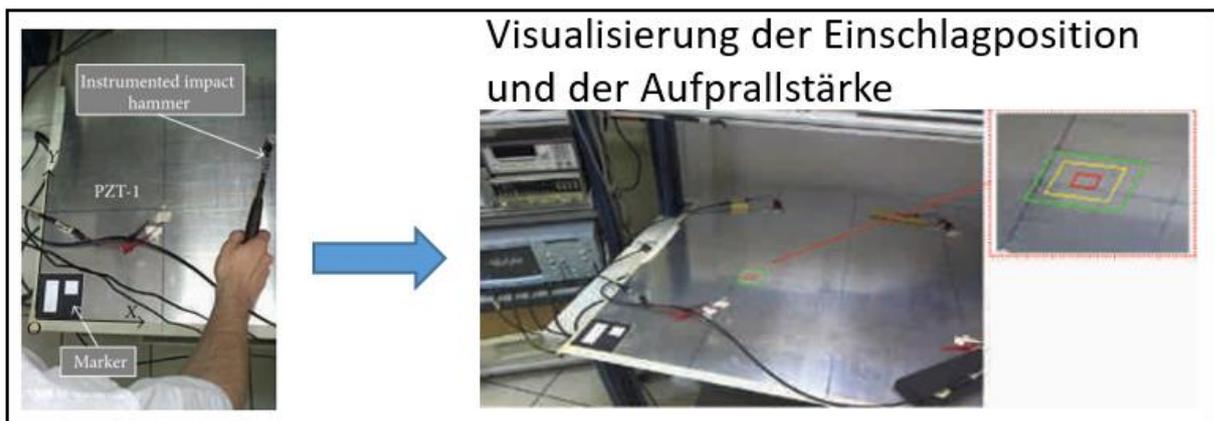


Abbildung 21: Versuchsaufbau und Visualisierung

(Quelle: Marchi et al., 2013)

In Abbildung 21 ist links zunächst die Ausgangssituation zu sehen. Die Ausrichtung der AR Brille wird anhand eines Markers bestimmt, der sich unten links im Bild befindet. Die Fläche wird dann mit einem Hammer beschlagen. Die Einschlagsposition und Aufprallstärke werden anhand von Sensoren gemessen und an die AR Brille weitergeleitet, welche dann wie rechts in der Abbildung zu sehen ist, visualisiert werden. Das Zentrum des roten Quadrates zeigt die geschätzte Einschlagsposition an. Das gelbe Quadrat zeigt die Stärke des Aufpralls an, wobei die Position gleichzeitig die Intensität anzeigt. Je näher das gelbe Quadrat zum grünen Quadrat positioniert ist, desto stärker der gemessene Aufprall.

⁷² Marchi et al. (2013) S. 1

⁷³ Farhidzadeh et al. (2013) S. 1607

Das Ergebnis des Versuchs zeigt, dass eine Echtzeitvisualisierung von Umweltauswirkungen auf einen Prüfgegenstand mithilfe von AR grundsätzlich möglich ist und somit Potenzial hat, im Bereich der Instandhaltung und Wartung eingesetzt zu werden⁷⁴.

In einer empirischen Studie von Fiorentino et al. wird untersucht, inwiefern technische Instandhaltungsmaßnahmen durch das Hinzuziehen von AR-Anweisungen unterstützt werden kann⁷⁵. Ziel der Studie ist zu zeigen, dass animierte Anleitungsschritte ein intuitiveres Verständnis als klassische schriftliche Papieranleitungen liefern. Im ersten Konzept wurde ein HMD verwendet welches aber aufgrund des Gewichts, der Einschränkung der Sicht und der schlechten Sichtbarkeit der Überlagerung von den Nutzern der Studie nicht positiv aufgenommen wurde. Daher wurde in einem neuen Konzept ein Projektor verwendet, der Aufnahmen mehrerer Szenen auf einen 2,5 Meter großen Bildschirm projiziert, wie in Abbildung 22 zu sehen ist.

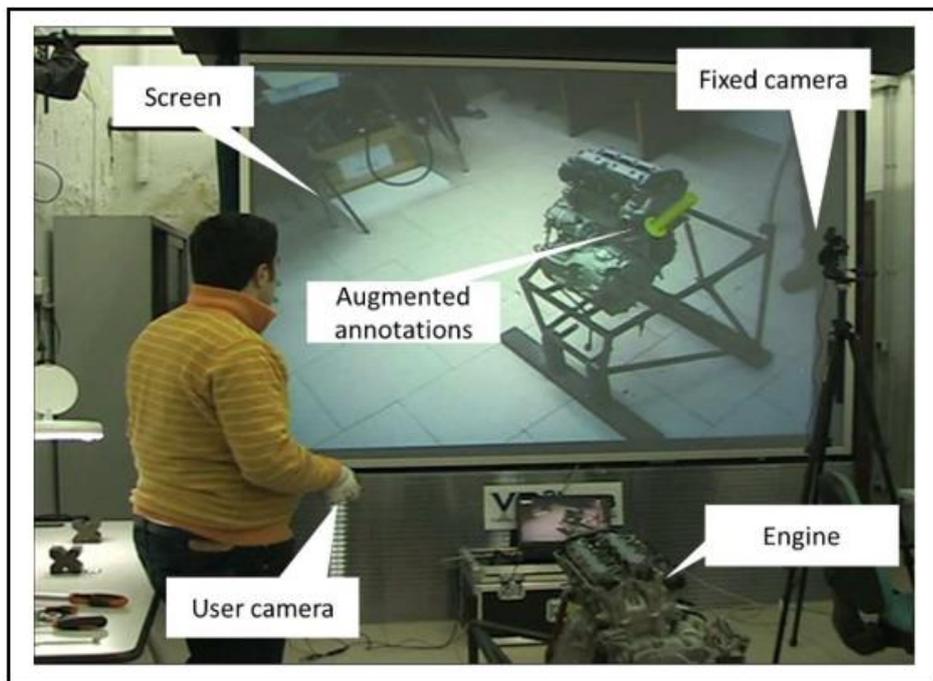


Abbildung 22: Ansicht des Versuchsaufbaus

(Quelle: Fiorentino et al., 2013)

Ebenfalls in der Abbildung zu sehen sind weitere Kameras, die insgesamt Aufnahmen von drei Szenen tätigen:

1. Werkzeuggestisch
2. Bauteilansicht
3. Nutzeransicht

⁷⁴ Marchi et al. (2013) S. 7

⁷⁵ Fiorentino et al. (2014)

Abbildung 23 zeigt, wie die Aufnahmen des Werkzeuggestisches realisiert wurden. Die Kamera ist oberhalb eines Werkzeuggestisches aufgebaut, um den Nutzer bei der Auswahl des richtigen Werkzeugs zu unterstützen. Die Bauteilansicht wird ebenfalls statisch anhand eines Kamerastandes aufgenommen. Lediglich die Nutzersicht ist nicht statisch, da die Kamera anhand einer Kette im Bereich der Hüfte getragen wurde. Die Länge der Kette erlaubte aber auch die gezielte Ausrichtung der Kamera durch das Anheben der Kamera. Grund für die verschiedenen Szenen ist das Vermeiden von häufig auftretenden Fehlern in der Instandhaltung wie die falsche Auswahl des Werkzeugs, des Bauteils oder die falsche Positionierung von Bauteilen. Auf der rechten Seite von Abbildung 23 ist zu sehen, wie AR Elemente mit den Aufnahmen der Kamera der Nutzeransicht, beziehungsweise der Motoransicht, überlagert und als Projektion auf einem Bildschirm angezeigt werden. Durch Animationen wird sowohl die Reihenfolge als auch das zu verwendende Werkzeug und Schraubrichtung angezeigt.



Abbildung 23: Links Werkzeuggestisch - Rechts Überlagerte Ansicht des Motors

(Quelle: Fiorentino et al., 2013)

Die Teilnehmer der Studie führten jeweils vier Aufgaben durch:

1. Identifizierung eines bestimmten Werkzeugs
2. Demontage der Zylinderkopfabdeckung
3. Identifizierung der Auslassnockenwelle
4. Demontage der Auslassnockenwelle

Die Analyse der Studie ergab eine signifikante Verringerung der Fehlerrate bei der Identifizierung der Werkzeuge und der Auslassnockenwelle. Bei den Demontageaufgaben 2 und 4 konnte ebenfalls eine verringerte Fehlerrate gemessen werden, welche aber weniger signifikant war. Neben der Fehlerrate wurde auch die benötigte Zeit bis zum Abschluss der Aufgaben gemessen. Diese konnte durch die Verwendung von AR Instruktionen ebenfalls

signifikant reduziert werden. Sowohl die Gesamtzeit zum Abschluss aller Aufgaben, als auch die Zeit für den Abschluss jeder einzelnen Aufgabe konnte signifikant verringert werden. Die Verwendung des AR Projektors wurde von den Teilnehmern als einfach und intuitiv beurteilt.

In der Studie von Sanna et al. konnten mithilfe eines Hand-held Displays in Form eines Tablets ähnlich positive Ergebnisse durch die Anwendung von AR im Bereich der Instandhaltung erzielt werden⁷⁶. Die Probanden hatten im Rahmen der Studie die Aufgabe eine Festplatte aus einem Laptop auszutauschen. Verglichen wurden hierbei die Zeiten bis zum Abschluss des Austauschs und die Menge an Fehlern zwischen einer schriftlichen Anleitung und einer AR unterstützten Instruktion. Die Studie wurde mit Studenten des Studiengangs Informatik und Visuelles Design durchgeführt. Die Ergebnisse der Studenten des Studiengangs Informatik zeigten, dass die Anwendung von AR-Anweisungen im Vergleich zu schriftlichen Anweisungen überraschend zu einer nahezu Verdopplung der Abschlusszeit führte. Außerdem konnte die Fehlerquote um 70% reduziert werden. Hinzuzufügen ist, dass die Studenten des Studiengangs Informatik bereits Erfahrung mit Austausch von Hardware hatten. Daher vermuten die Autoren eine Abhängigkeit zwischen der Fähigkeit beziehungsweise des Wissens der einzelnen Probanden und der Effizienz von AR Anweisungen. In der Gruppe der Studenten des Studiengangs Visuelles Design, die keine Vorkenntnisse mit Hardwarewechseln besaßen, wurden gänzlich verschiedene Ergebnisse erzielt.

Die Durchschnittszeit zur Durchführung des Hardwaretauschs mit AR betrug 630,5 Sekunden, wohingegen die Durchschnittszeit ohne AR bei 671 Sekunden lag.

Die durchschnittliche Zeit der Durchführung konnte somit um 30,5 Sekunden verringert werden. Die Fehlerrate konnte im Vergleich zur schriftlichen Anleitung ähnlich wie im ersten Versuch um 67% gesenkt werden. Leider wurden die durchschnittlichen Durchführungszeiten des ersten Versuchs mit den erfahrenen Studenten nicht in der Arbeit verschriftlicht. Die Ergebnisse suggerieren, dass unerfahrenere Personen einen höheren Nutzen aus AR Anweisungen ziehen können als erfahrene Personen⁷⁷.

⁷⁶ Sanna et al. (2015)

⁷⁷ Sanna et al. (2015) S. 1f



Abbildung 24: AR Anleitung – Festplattenaustausch

(Quelle: Sanna et al., 2015)

Masoni et al. stellen in ihrer Arbeit einen ähnlichen Ansatz vor⁷⁸. Die Autoren stellen einen Fernunterstützungsansatz vor, der mithilfe eines Hand-held Displays durchgeführt werden kann. Der Experte ist dadurch in der Lage mit mehreren unerfahrenen Monteuren abwechselnd zu kommunizieren. Die Kommunikation zwischen dem Experten und den Monteuren findet durch eine Echtzeit Videoaufnahme statt, die mithilfe des Hand-held Displays vom Monteur gemacht wird und dann zum Experten gesendet wird. Diese Aufnahme kann dann vom Experten mit Kommentaren, Annotationen oder selbst gezeichneten Symbolen in verschiedenen Farben versehen und zurückgesendet werden. Eine Kommunikation ist darüber hinaus via Textnachrichten möglich. Der Monteur erhält das bearbeitete Bild zurück und kann dann den Anweisungen des Experten folgen. Auf der linken Seite von Abbildung 25 ist eine Aufnahme zu sehen, die der Experte zugesendet bekommen hat und mit Annotationen versehen ist. Im folgenden Schritt wird diese Aufnahme an den Monteur gesendet, wie rechts zu sehen ist. Die Arbeitsanweisungen sind mit Zahlen und Pfeilen markiert.

⁷⁸ Masoni et al. (2017)

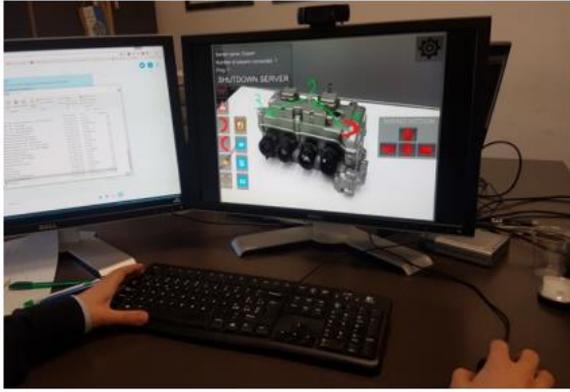


Abbildung 25: Fernunterstützung mit einem hand-held-display

(Quelle: Masoni et al., 2017)

2.4.3 Daimler interne Anwendungsbereiche von AR

In 2019 wurde das System AR Remote Service getestet und intern im Konzern eingeführt. AR Remote Service ist ein Dienst, der für Smart Glasses für iOS und Desktop PCs/Laptops entwickelt wurde, mit dem Ziel, die konzernweite Zusammenarbeit ohne physisches Reisen zu ermöglichen. Um dies möglich zu machen, werden Echtzeit-Videoübertragungen von den Smart Glasses aufgenommen, welche dann an einen Mitarbeiter gesendet werden können, der dann den Prozess mitverfolgen und wenn notwendig auch einschreiten und kommentieren kann. Haupteinsatzgebiet der Dienstleistung ist aktuell im Bereich der Fahrzeugerprobung. Beispielsweise finden Fahrzeugerprobungen in der ganzen Welt statt, da die klimatischen Bedingungen der Länder das Testen der Fahrzeuge und Komponenten in Extremsituation ermöglicht. Damit nicht alle Beteiligten bei Problemen ins Ausland reisen müssen, wird der AR RemoteService eingesetzt, um eine Fernwartung zu ermöglichen.

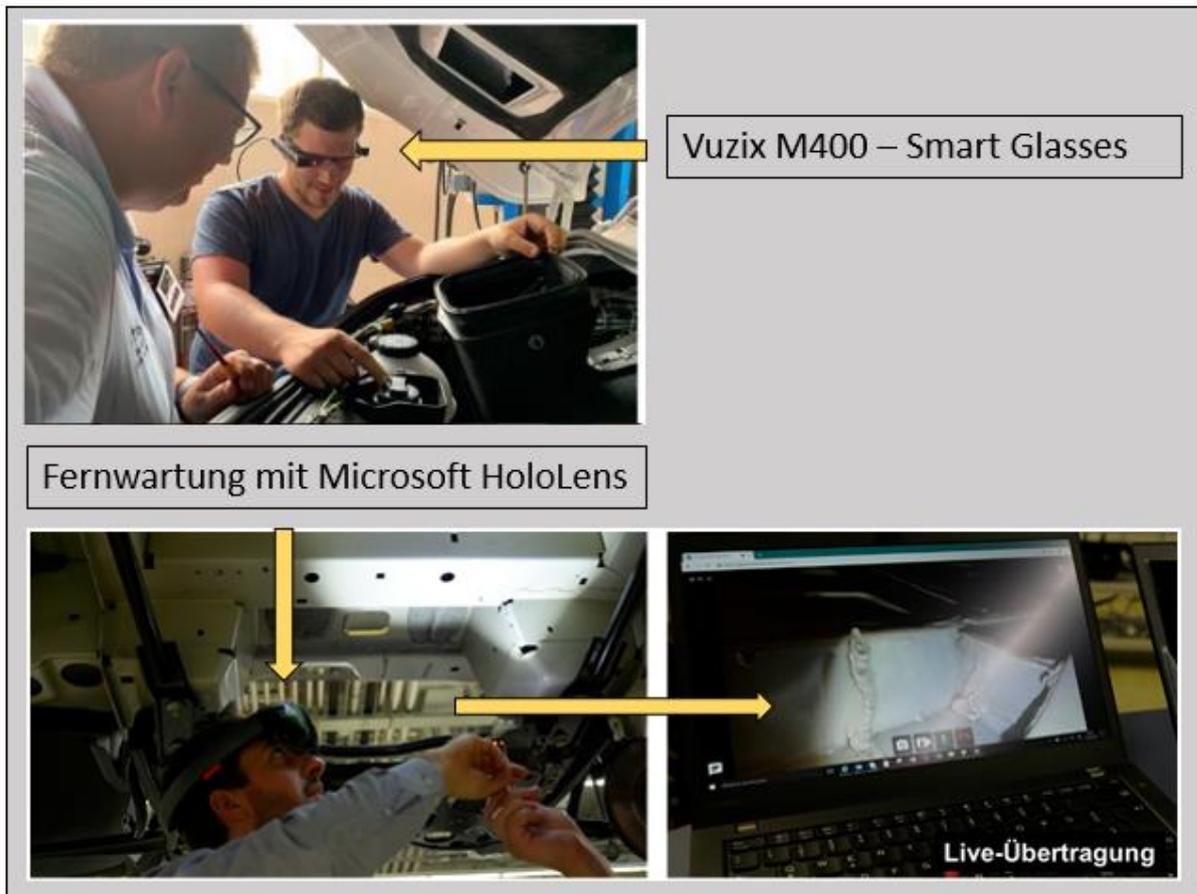


Abbildung 26: Daimler AR Remote Service

(Quelle: Daimler interne Mediathek)

Veo:MR stellt eine Anwendung dar, durch die ein Untersuchungsobjekt mithilfe von Echtzeit-Überlagerung von 3D Daten und Videobild überprüft werden kann. Benötigt wird ein mechanisches Trackingsystem wie beispielsweise ein FARO-Arm. FARO-Arme werden für eine berührungslose Vermessung von Bauteilen verwendet und ermöglichen auch die Erfassung von Punktwolken. Daher eignen sich diese im Bereich der Qualitätskontrolle, um Punktwolkenvergleiche mit CAD und 3D-Modellierungen zu erstellen. Besonderheit dieser Dienstleistung besteht darin, dass sowohl 3D Daten als auch die Erfassung von Videodaten kombiniert werden kann. Sinnvoll sind kombinierte Daten wie die eben beschriebenen im Bereich des Prototypenbaus, da in Echtzeit Messdaten am Prüfobjekt mit den Daten des CAD-Objektes verglichen werden können und über einen Bildschirm verfolgbar sind. Zwei unternehmensinterne Einsatzgebiete von veo:MR sind im Bereich des Prototypenbaus und der Baubarkeitsabsicherung. Durch die ermöglichte weltweite Zusammenarbeit zwischen beteiligten Akteuren ist veo:MR ein angesehenes Hilfsmittel.



Abbildung 27: Daimler FARO-Arm Messung

(Quelle: Daimler interne Mediathek)

In den beschriebenen Versuchen wurde aufgezeigt, in welchen Bereichen Forschung im Bereich AR betrieben wird und, dass die durchgeführten Versuche einige vielversprechende Ergebnisse geliefert haben. Versuche und Ansätze mit VR werden im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben, da ein Merkmal von VR, wie in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, das immersive Eintauchen in eine simulierte Welt notwendig ist. Durch die Immersion wäre aber das Prüfobjekt nicht mehr sichtbar und wäre darüber hinaus sicherheitstechnisch höchst kritisch anzusehen. Die Kontrolle wäre dadurch maßgeblich gestört. Darüber hinaus müsste eine Simulation des Prüfprozesses geschaffen werden und Gegebenheiten realitätsnah umgesetzt werden, was mit einem hohen Entwicklungsaufwand verbunden wäre, der keinen zusätzlichen Nutzen stiften würde⁷⁹. Des Weiteren geht mit VR einher, dass eine gewisse Distanz zur Realität aufrechterhalten wird, da der Anwender sich ausschließlich in einer virtuellen Welt befindet. Gerade dieser Bezug zur Realität, der in AR gegeben ist, wird im Rahmen dieser Arbeit als entscheidend bewertet, da einer der Erfolgskriterien der Arbeit darin besteht, ein Hilfsmittel für die Endkontrolle zu finden, welches aktiv während der Kontrolle eingesetzt werden kann.

⁷⁹ Wang et al. (2018) S. 1

Der Einsatz von AR, sei es durch AR Brillen, Hand-held Displays oder Projektoren hat in den betrachteten Studien gezeigt, dass durch den Einsatz von AR positive Ergebnisse im Bereich der Endkontrolle zu erwarten sind. In der im Abschnitt 2.4.1 erläuterten Arbeit von Bichlmeier et al. liegt eine zur Problemstellung dieser Arbeit vergleichbare Ausgangssituation vor⁸⁰. Der Arzt muss während der Operation mit verschiedenen Hilfsmitteln arbeiten, was ein HMD ermöglicht, da die Hände für diverse Werkzeuge genutzt werden müssen. Ein separat montierter Bildschirm führt zwangsläufig zu einem Fokuswechsel, der durch ein HMD umgangen werden konnte. Die Integration der Kamerasicht des Endoskops in die AR Brille führte zu einer verbesserten Koordination mit dem Endoskop und ermöglichte ein intuitiveres Verständnis der Wahrnehmung. Im Bereich der Instandhaltung und Wartung konnte ebenfalls gezeigt werden, weshalb die Einführung von AR vorteilhaft sein kann. Die augmentierte Darstellung ermöglicht es vor allem unerfahrenen Mitarbeitern, wichtige Arbeitsschritte korrekt und in der richtigen Reihenfolge mit dem richtigen Werkzeug zu durchlaufen, wie in der Arbeit von Sanna et al deutlich wurde⁸¹. Neben der korrekten Abarbeitung der Arbeitsschritte konnte ebenfalls eine Reduzierung der benötigten Arbeitszeit pro Arbeitsschritt gemessen werden. Zeit, welche innerhalb von wirtschaftlich tätigen Unternehmen für eine relevante Kennzahl für die Bestimmung von Aufwand und Kosten steht, kann somit potenziell eingespart werden. Im folgenden Abschnitt wird der Prüfprozess modelliert und auf dieser Basis das mögliche Optimierungspotential aufgezeigt.

⁸⁰ Bichlmeier et al. (2007) S. 8

⁸¹ Sanna et al. (2015 - 2015) S. 179

3. Auswahl des AR-Mediums auf Basis einer Ist-Analyse des Prüfprozesses

In diesem Kapitel wird zunächst der zu Grunde liegende Prüfprozess der Qualitätskontrolle mithilfe von EPK modelliert und im Anschluss ein mögliches Optimierungspotential beschrieben. Anschließend werden die Initialkonzepte vorgestellt, welche in drei Kategorien untergliedert sind. Umzusetzen sind die Konzepte mithilfe von verschiedenen AR-Medien. Um ein geeignetes AR-Medium auszuwählen, werden die in Kapitel 2 beschriebenen AR-Medien im Rahmen einer Diskussion gegenübergestellt und ein Favorit bestimmt. Verschiedene AR-Brillen, welche sich im Rahmen der Gegenüberstellung durchgesetzt haben, werden daraufhin ausgewählt. Bei der Auswahl der AR-Brillen wurde auf die Diversifizierung der Stärken und Schwächen der jeweiligen AR-Brillen geachtet, um ein möglichst großes Spektrum an verschiedenen AR-Brillen abzudecken. Nach der Auswahl werden die zu überprüfenden Konzepte vorgestellt. Im Anschluss werden Testapplikationen für die drei AR-Brillen und Ansätze entwickelt, die dann im Rahmen eines Testversuchs im Werk der Mercedes-Benz AG in Untertürkheim durchgeführt werden. Mit der Versuchsdurchführung endet dieses Kapitel.

3.1 Prozessbeschreibung und Optimierungspotenzial

Der Prozess der Qualitätskontrolle wurde mithilfe der Software Aris Express 2.4d modelliert. Verwendet wurde dafür die Modellierungssprache EPK, welche für die Dokumentation von Geschäftsprozessen angewendet wird. In Abbildung 28 sind alle Symbole der Modellierungssprache aufgelistet.

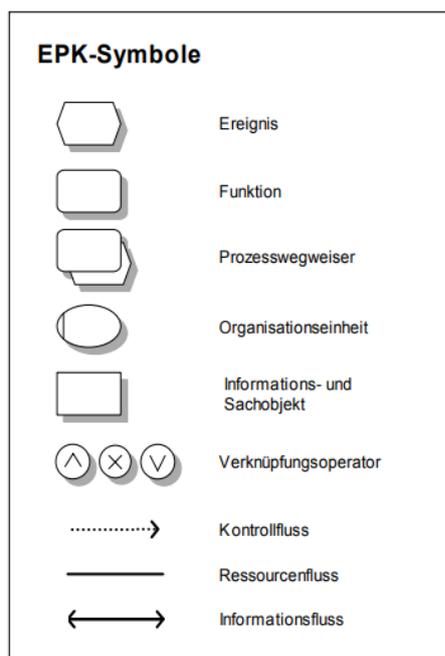


Abbildung 28: EPK Symbole

(Quelle: Nüttgens & Rump, 2002)

In Abbildung 29 ist der Prozess der Qualitätskontrolle von Kurbelgehäusen in den Werken der Mercedes-Benz AG dokumentiert, der im Folgenden als Prüfprozess bezeichnet wird.

3.1.1 Prozessbeschreibung mit EPK

Begonnen wird der Prüfprozess mit dem Ereignis „Endkontrolle des Bauteils gefordert“. Das Kurbelgehäuse, welches vom Lieferanten in Werk A eingegangen ist und alle in Werk A zu durchlaufenden Arbeitsschritte absolviert hat, ist bereit für die Endkontrolle. Das Kurbelgehäuse wird durch ein Fließband in die Endkontrolle transportiert und trifft ein. Bevor der Kontrolleur das Kurbelgehäuse betrachten kann, werden im Schritt „Aufnahme und Analyse des Bauteils durch Software“ Aufnahmen des Kurbelgehäuses gemacht und auf Basis dieser eine Analyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse werden auf einem separaten Monitor angezeigt. Das Kurbelgehäuse wird dann in einem Rhönrad fixiert, um Rotationen, sowohl horizontaler als auch vertikaler Art, zu ermöglichen und somit die Handhabung zu vereinfachen. Die Endkontrolle wird durch die Ergebnisse der Software und die Informationen des physischen Fehlerkatalogs unterstützt und durchgeführt. Falls der Kontrolleur während der Kontrolle einen Mangel entdeckt, beginnt die Fehlerbehebung des Bauteils. Insofern es sich bei dem Mangel um einen manuell behebbaren Mangel handelt, wird dieser an Ort und Stelle vom Kontrolleur behoben. Das Ereignis „Fehlerbehebung erfolgreich“ tritt ein und das Bauteil wird zur erneuten Kontrolle an die Endkontrolle geleitet. Falls eine Fehlerbehebung durch den Kontrolleur nicht möglich ist, tritt das Ereignis „Fehlerbehebung nicht erfolgreich“ ein. Das Bauteil wird anschließend zur Verschrottung ausgeschleust. Durch diese Funktion endet die Endkontrolle und ist abgeschlossen. Falls während der Funktion „Kontrolle durchführen“ kein Mangel entdeckt wird, tritt das Ereignis „Bauteil ist einwandfrei“ ein. Das Bauteil kann dann direkt an den nächsten Prozess weitergeleitet werden. Auch in diesem Fall ist die Endkontrolle hiermit abgeschlossen.

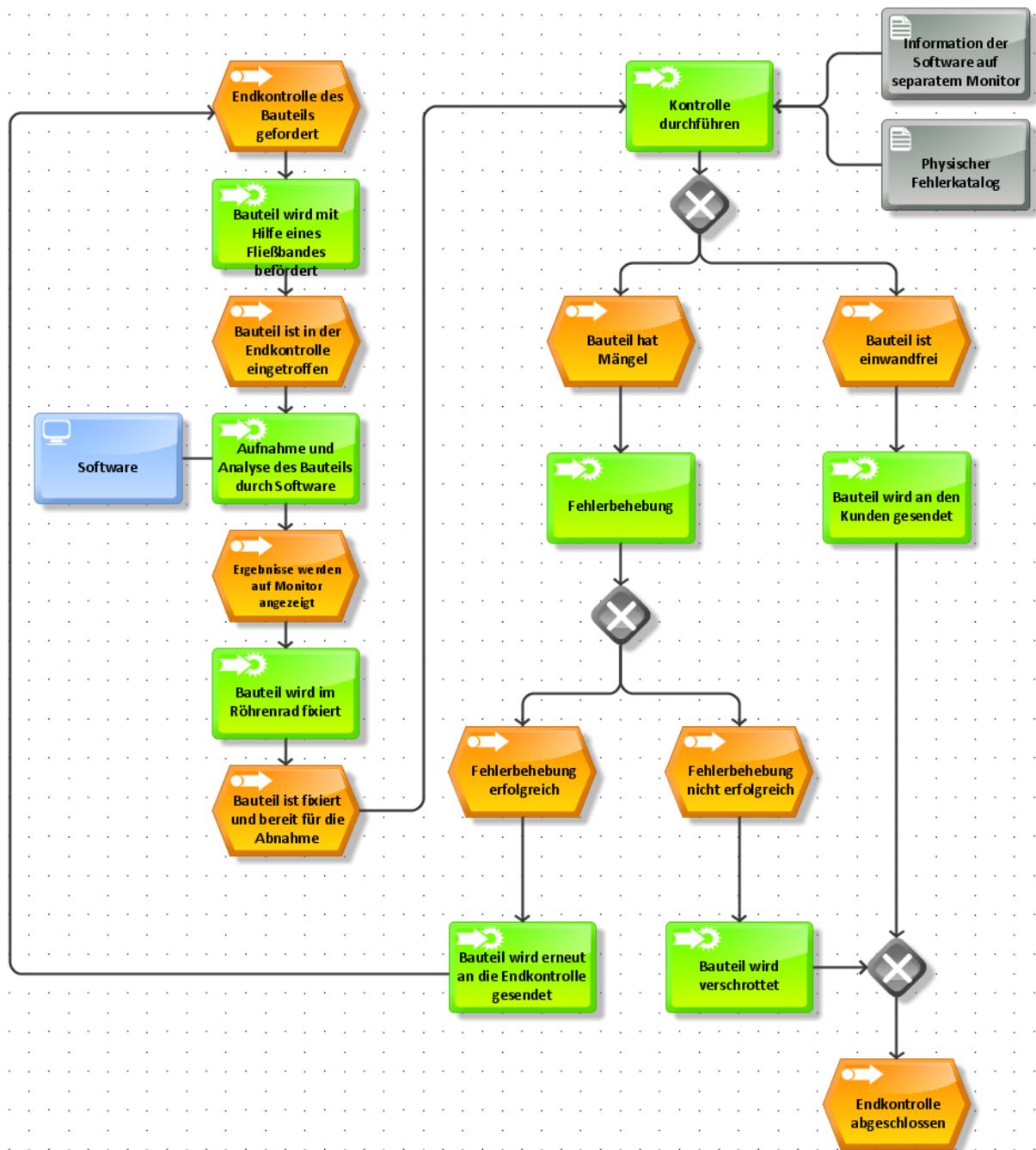


Abbildung 29: EPK des Qualitätssicherungsprozesses am Beispiel von Kurbelgehäusen

(Quelle: Eigene)

3.1.2 Optimierungspotential

Durch die geplante Integration von AR in den Prüfprozess ändert sich das Ereignis „Ergebnisse werden auf Monitor angezeigt“ zu „Übermittlung der Ergebnisse an AR-System“. Die Funktion „Kontrolle durchführen“ wird an ein neues IT System angebunden und die Inputs „Informationen der Software“ und „Fehlerkatalog“ sind Bestandteil des neuen IT-Systems „AR-Systems“. Somit sind sämtliche Informationen, die zur Fehlerbehebung notwendig sind, im

AR-System vereint. In Abbildung 31 ist der neue Prüfprozess modelliert. Verglichen mit dem initialen Prüfprozess aus Abbildung 31 ändert sich das Ereignis „Ergebnisse werden auf Monitor angezeigt“ und die Inputs werden geändert, was zunächst als lediglich kleine Änderung wahrgenommen werden könnte. Jedoch ist durch die Einführung des AR-Systems ein großes Verbesserungspotential möglich, wie die in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Ergebnisse der Studien von Sanna et al. und Fiorentino et al. suggerieren^{82 83}. In der Studie von Sanna et al. wurde gezeigt, dass der Unterschied zwischen einer schriftlich verfassten Anleitung und einer augmentierten Anleitung zu einer Fehlerreduzierung führte, unabhängig davon, ob die Versuchspersonen in der getesteten Kategorie bereits erfahren war oder nicht⁸⁴. Ähnlich waren die Beobachtungen in der Versuchsreihe von Fiorentino et al., da auch hier die Ergebnisse zeigten, dass sowohl eine Reduzierung der Fehlerrate, als auch eine Reduzierung der Arbeitszeit erzielt werden konnte⁸⁵. Im Versuch von Bichlmeier et al. lag eine ähnliche Ausgangslage wie in der in Abbildung 29 gezeigten Darstellung des Prüfprozesses vor⁸⁶. In der Ausgangssituation von Bichlmeier wurden die Kameraaufnahmen des Endoskops ebenfalls auf einem separaten Bildschirm angezeigt. Durch die Einführung eines HMD, konnten die Aufnahmen des Endoskops direkt auf den integrierten Bildschirm der AR-Brille projiziert werden, was dazu führte, dass die Navigation des Endoskops verbessert werden konnte und ein intuitiveres Verständnis über die Positionierung und Ausrichtung des Endoskops vermittelt werden konnte⁸⁷. All diese Studien zeigen, dass die Einführung von AR, sei es als HMD, Projektor oder Handheld Display, zu einer Verbesserung der jeweiligen Prozesse beiträgt und somit eine vielversprechende Technologie darstellt, um auch den vorliegenden Prüfprozess zu optimieren.

Jedoch ist an dieser Stelle abzuwägen, welche Visualisierungsform von AR, der in Kapitel 2.2 vorgestellten Darstellungsweisen von Augmentierungen für den vorliegenden Anwendungsfall am sinnvollsten ist.

In Abbildung 30 ist eine beispielhafte Veranschaulichung des Optimierungspotentials abgebildet. Auf der linken Seite der Abbildung ist das Kurbelgehäuse abgebildet, welches rechts durch die Verwendung eines AR-Mediums mit Markierungen überlagert wird. Durch die Überlagerung und die weitere Anzeige von Text und Bild kann einem Fokuswechsel entgegengewirkt und die Kontrolle vereinfacht werden.

⁸² Sanna et al. (2015 - 2015)

⁸³ Fiorentino et al. (2014)

⁸⁴ Sanna et al. (2015 - 2015) S. 1f

⁸⁵ Fiorentino et al. (2014) S. 7ff

⁸⁶ Bichlmeier et al. (2007)

⁸⁷ Bichlmeier et al. (2007) S. 8

Endkontrolle mit Hilfe von AR-Technologie

Potential

1. Kein Fokuswechsel
2. Überlagerung möglich

- Text
- Bild
- Überlagerung

➔ Ausgabe durch AR-Brille

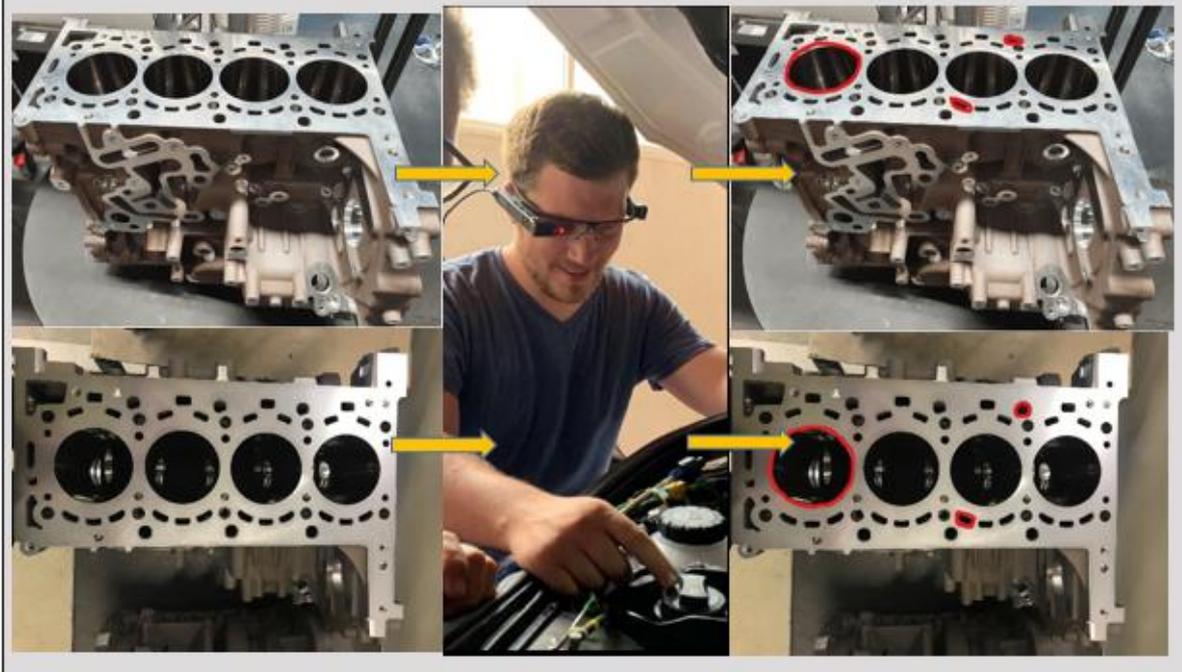


Abbildung 30: Endkontrolle mithilfe von AR

(Quelle: Eigene)

3.1.3 Auswahl des AR-Mediums

Zunächst können Head-up und Head-down Displays ausgeschlossen werden, da diese statisch montiert werden müssen und somit der aktuellen Situation mit dem separaten Monitor sehr ähnlich ist. Des Weiteren ist die Augmentierung direkt auf dem Prüfgegenstand oder im Sichtfeld des Kontrolleurs wünschenswert, weshalb im Falle eines statisch befestigtes Head-down oder Head-up Displays nur möglich wäre, wenn dieses direkt vor oder über dem Prüfgegenstand montiert würde. Dadurch wäre aber die haptische Kontrolle erschwert, da der Bildschirm permanent zwischen dem Kontrolleur und dem Prüfgegenstand stehen würde. Somit steht dem Vorteil die Augmentierung zu sehen ein großer Nachteil gegenüber, der mit hoher Wahrscheinlichkeit den Prüfprozess behindern könnte.

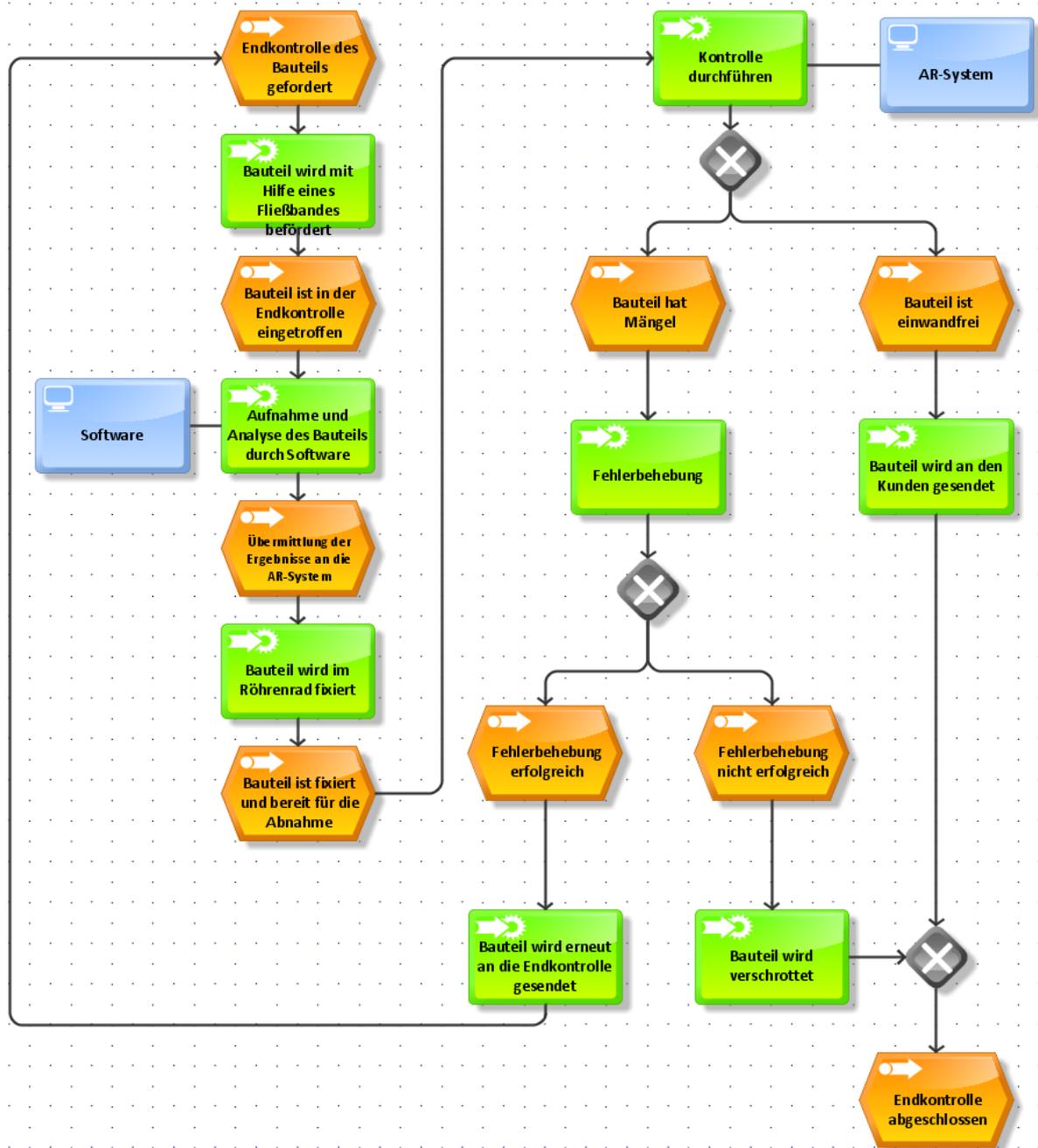


Abbildung 31: EPK des Qualitätssicherungsprozesses mit AR System

(Quelle: Eigene)

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Handheld Displays werden wie in den Studien von Sanna et al. und Masoni et al. im Bereich der Instandhaltung und Wartung verwendet und stellen somit vielversprechende Möglichkeiten dar, Augmentierungen sichtbar zu machen^{88 89}. Jedoch implizieren Handheld Displays, dass diese zur Verwendung in der Hand gehalten werden müssen. Eine gleichzeitige haptische Untersuchung des Prüfgegenstandes und Informationsaufnahme anhand der Augmentierung ist somit nicht möglich, welche aber im

⁸⁸ Sanna et al. (2015)

⁸⁹ Masoni et al. (2017)

Rahmen dieses Anwendungsfalles wünschenswert wäre. Des Weiteren würde ein Handheld Display weiterhin zu einem wechselnden Fokus zwischen Prüfgegenstand und augmentierter Sicht führen, welche aber durch Projektoren und HMD umgangen werden könnten, da diese beiden Methoden die Augmentierung ohne Fokuswechsel ermöglichen. Die Befestigung eines Handheld Displays am Arbeitsplatz wäre ebenfalls denkbar, um eine freihändige Kontrolle zu ermöglichen. Allerdings ist der Bereich in dem sich der Kontrolleur während der Endkontrolle aufhält mit 1,5m² eher klein. Des Weiteren benötigen die Kontrolleure genug Freiraum, um die Kontrolle uneingeschränkt durchführen zu können, um beispielsweise Werkzeuge einfach zu erreichen. Darüber hinaus steht der Kontrolleur während der Kontrolle unmittelbar vor dem Prüfgegenstand, weshalb ein freischwebender Bildschirm wie im zuvor beschriebenen Fall von Head-up und Head-down Displays zwischen Prüfgegenstand und Kontrolleur befestigt werden müssten. Da der Kontrolleur den Prüfgegenstand im Rhönrad auch drehen kann, müsste der Bildschirm an einem extra dafür eingeführten Träger oder Stand befestigt werden, welcher den Arbeitsplatz weiter einschränken würde. Somit sind Handheld Displays für den vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet.

Weiterhin abzuwägen ist die Verwendung von AR-Projektoren für den Anwendungsfall. Einige vorteilhafte Gegebenheiten für den sinnvollen Einsatz eines AR-Projektors bestehen darin, dass die Kontrolle an einem statischen Ort mit dauerhaft gleichbleibenden Lichtverhältnissen und einer initial pro Prüfgegenstand gleichbleibenden Ausgangsposition gegeben ist.

Der Vorteil von AR-Projektoren besteht darin, dass die Augmentierung direkt am Prüfgegenstand angezeigt werden kann. Somit besteht die Problematik des Fokuswechsels nicht mehr, da kein separater Bildschirm zwischen Kontrolleur und Prüfgegenstand angebracht werden muss. Dadurch würde auch die natürliche Sicht des Kontrolleurs nicht eingeschränkt werden. Nachteile einer Projektorlösung bestehen aber in der Arbeitsumgebung und am Prüfgegenstand des Anwendungsfalles. Der Arbeitsplatz im Anwendungsfall ist sehr hell und gut ausgeleuchtet. Dies ist zwingend notwendig, damit die Kontrolleure eine gute Sicht auf den Prüfgegenstand haben. Allerdings wirkt sich eine hellausgeleuchtete Umgebung schlecht auf die Projektion aus, da es schwieriger ist in einer hellen Umgebung eine Kontrastreiche Projektion anzuzeigen. Eine Leinwand könnte diesem Problem entgegenwirken, ist aber aufgrund der Größe des Arbeitsplatzes nur mit Einschränkungen möglich. Das aus Aluminium gefertigte Kurbelgehäuse weist des Weiteren eine spiegelnde Oberfläche auf, was ebenfalls die Sichtbarkeit der Projektion verschlechtert. Eine Anzeige ist zwar möglich, erfordert aber einen leistungsstärkeren Projektor, was bedeutet, dass die maximale mögliche Durchsatzmenge an Licht pro Zeit, gemessen in Lumen, überdurchschnittlich hoch sein muss⁹⁰. Dies führt zwangsläufig zu erhöhten Anschaffungskosten für den Projektor. Eine Alternative stellt ein Projektor dar, der mit Lasern arbeitet. Diese sind aber in der Menge an

⁹⁰ Heinsohn (2020)

gleichzeitig anzeigbaren Elementen begrenzt und sind grundsätzlich um ein Vielfaches teurer als Projektoren, die mit Licht arbeiten. Dieser hätte den Vorteil, trotz schlechter Kontrastverhältnisse die Augmentierung gut sichtbar zu machen. Jedoch sind Laserprojektoren nicht darauf ausgerichtet, flächendeckende Projektionen abzubilden und sind somit auf gezielte und kleine Projektionen beschränkt⁹¹. Eine flächendeckende Anzeige verschiedener Informationen ist somit nur mit einem Lichtprojektor möglich, welcher aber aufgrund der vorliegenden Kontrastverhältnisse im vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet ist.

Darüber hinaus ist die Projektorlösung mit vergleichsweise höheren Anschaffungskosten, sowohl für Hardware als auch der Installation verbunden als bei den zuvor beschriebenen Varianten. Ebenfalls wäre eine mobile Lösung, wie sie ein HMD liefern könnte deutlich wünschenswerter, um einen flexiblen Einsatz zu ermöglichen. Schlussendlich wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Überprüfung der Sinnhaftigkeit eines HMDs angefragt, weshalb anschließend die Eignung von HMD betrachtet wird.

Somit ausstehend ist die Abwägung die Augmentierungen mithilfe von HMDs durchzuführen. HMDs haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu AR-Projektoren, Handheld, Head-up und Head-down Displays keine Halterung oder Aufbau benötigen, um den Bildschirm oder Projektion im Sichtfeld des Kontrolleurs anzubringen. Somit schränken HMDs den ohnehin bereits kleinen Arbeitsplatz nicht weiter ein. Weiterer Vorteil des HMDs ist, dass die Augmentierung im Falle des HMDs nicht direkt auf einer spiegelnden Oberfläche projiziert werden muss, sondern auf dem Bildschirm des HMDs angezeigt wird. Dennoch stellt die spiegelnde Oberfläche des Kurbelgehäuses eine Herausforderung an die Anzeige der Augmentierungen und an das Tracking der AR-Brille dar. Die Kosten eines HMDs sind im Vergleich zu einer Projektorlösung ebenfalls um ein Vielfaches geringer, weshalb das HMD aus Unternehmenssicht ein attraktiver Kandidat für einen Pilotversuch darstellt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden auf Basis der Untersuchungen in Kapitel 2 und der vorangegangenen Abwägung von Vor- und Nachteilen der möglichen Geräte, die AR-Brille als Visualisierungsgerät für den vorliegenden Prüfprozess gewählt. Auch wenn die Auswahl schlussendlich auf die AR-Brille gefallen ist stellen AR-Projektoren eine vielversprechende Alternative dar, die in zukünftigen Untersuchungen genauer untersucht werden sollte, da der Hauptgrund für die Entscheidung gegen die Projektorlösung hauptsächlich darin bestand, dass die am Arbeitsplatz vorliegenden Einschränkungen in Form von Fläche und Ausleuchtung im spezifischen Anwendungsfall unvorteilhaft sind und die AR-Brille insgesamt geeigneter zu sein schien.

⁹¹ Heinsohn (2020)

3.2 Vorstellung geeigneter AR-Brillen

Da die Auswahl des Visualisierungsgerätes bestimmt wurde, werden im folgenden Schritt mögliche AR-Brillen vorgestellt, die sich für den vorgestellten Anwendungsfall eignen könnten. Berücksichtigt wurde bei der Auswahl der AR-Brillen, dass diese in ihrer Leistung, ihrem Komfort und ihrer Bedienungsfähigkeit Unterschiede aufweisen, um ein möglichst breites Spektrum an Eigenschaften abzudecken.

Das Gewicht der AR-Brille ist maßgeblich bei der engeren Auswahl der Modelle, da ein zu hohes Gewicht bei längerem Tragen als unangenehm und störend empfunden werden könnte. Die Qualitätskontrollen in den Werken der Mercedes-Benz AG finden in einem Schichtsystem statt. Die Schicht beginnt morgens zur vollen Stunde und endet nachmittags. Während dieser Schicht ist eine Frühstückspause und eine Mittagspause vorgesehen. Dazu kommt eine Verweilzeit. Somit verbringt der Kontrolleur die wesentliche Arbeitszeit mit der Kontrolle von Kurbelgehäusen, währenddessen die AR-Brille durchgehend für 3 bis 4 Stunden getragen werden muss. Daher ist der Komfort der AR-Brille von essentieller Bedeutung. Im Umkehrschluss muss die AR-Brille somit ein möglichst geringes Gewicht besitzen, komfortabel sein und dem Anwendungsfall entsprechende Leistung aufweisen. In Kapitel 2.2.1 wurde jedoch bereits auf die Problematik hingewiesen, dass AR-Brillen mit einem höheren Gesamtgewicht mit leistungsfähigerer Hardware ausgestattet ist, was darauf zurückzuführen ist, dass leistungsfähigere Hardware größer ist, besserer Kühlung bedarf und somit schwerer ist. Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass das Gesamtgewicht der AR-Brillen betrachtet wird, um zu beurteilen, ob es sich um eine eher leichte oder eher schwere AR-Brille handelt. Um diesen Zielkonflikt in der Wahl der AR-Brillen abzubilden, werden beide Extremvarianten gewählt. Das eine Extrem soll das Gewicht minimieren und dabei ein Mindestniveau von Leistung erbringen, sodass es vom Kontrolleur als sinnvolles Hilfsmittel erachtet wird. Das andere Extrem stellt eine AR-Brille dar, die maximalen Nutzen für die Endkontrolle stiftet und dabei ein Mindestniveau an Komfort bietet. Eine dritte AR-Brille soll im Rahmen dieses Versuchs hinzugezogen werden, die Eigenschaften beider Extreme in sich vereint. Zu finden ist eine AR-Brille, die ein Mindestmaß an Leistung mit sich bringt, sodass es für den Anwendungsfall und somit vom Kontrolleur als hilfreich eingeschätzt wird und gleichzeitig ein Komfortniveau aufweist, welches angenehm während der Schicht getragen werden kann.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Bedienungsfähigkeit der AR-Brille. Der Prüfprozess erfordert, dass der Kontrolleur beide Hände zur Verfügung hat, um beispielsweise das Kurbelgehäuse im Rhönrad zu fixieren und zu bewegen. Die Handhabung der AR-Brille sollte daher einfach und durch Sprachsteuerung, Berührungssensoren, haptischen Knöpfen oder Handinteraktionen steuerbar sein. Welche dieser Steuerungsmöglichkeiten am besten geeignet ist, kann erst nach einer Bewertung durch die Kontrolleure eindeutig bestimmt werden. Jedoch kann aufgrund der vorherrschenden Lautstärke während der Endkontrolle und

aufgrund der Tatsache, dass mehrere Kontrolleure gleichzeitig an zwei Kontrollstation arbeiten, die Sprachsteuerung ausgeschlossen werden. Zuletzt steht die Begründung für die grundsätzlich vorausgesetzte Eigenschaft der potentiellen AR-Brillen eines optical see-through Displays aus. Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert wurde, ermöglichen optical see-through Displays die echte Welt direkt einzusehen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für das Arbeitsumfeld, da eine Verwendung von video see-through Displays sicherheitstechnisch höchst kritisch ist. Die Sicherheit der Kontrolleure darf unter keinen Umständen beschnitten werden.

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wurden drei AR-Brillen mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt, deren Merkmale in Abbildung 32 verglichen werden.

	Vuzix Blade	Vuzix M400	HoloLens 2
Gewicht in Gramm	90	190	566
Sichtfeld in Grad	19	16,8	52
Interaktionsmöglichkeiten	Knöpfe	Touch, Knöpfe	Handtracking, Knöpfe
Bildschirmposition	Nur rechtes Auge	Nur rechtes Auge	Beide Augen
Prozessor/CPU	ARM Cortex-A53	Qualcomm XR1	Qualcomm Snapdragon 850

Abbildung 32: AR Brillen im Vergleich

(Quelle: Microsoft und Vuzix)

Mit 566 Gramm Gesamtgewicht ist die HoloLens 2 die schwerste der drei AR Brillen. Verbaut sind 4GB Arbeitsspeicher, 64GB interner Speicher und ein Qualcomm Snapdragon 850 Octa-core Prozessor^{92 93 94}. Die HoloLens 2 stellt somit die leistungsstärkste und technologisch am modernsten ausgestattete AR-Brille dar, hat jedoch den Nachteil eines mehr als neun Mal höheren Gewichts als die leichteste AR-Brille. Des Weiteren stellt die HoloLens 2 als einzige ausgewählte AR-Brille eine Steuerung auf Basis von Handtracking dar. Durch Handtracking können die Hände der Kontrolleure in Echtzeit verfolgt werden und eine Bedienung durch Hologramme ermöglichen, welche im Raum verankert sind und durch das Handtracking gesteuert werden können. Daher kann die Menüführung der HoloLens 2 im Sichtfeld der Kontrolleure positioniert werden. Darüber hinaus bietet die HoloLens 2 zwischen Augen und Bildschirm genug Platz um eine Brille zu tragen. Der Bildschirm kann sogar hochgeklappt werden, was dem Kontrolleur eine uneingeschränkte Sicht ermöglicht. Alleinstellungsmerkmal

⁹² Microsoft HoloLens 2 (2021a)

⁹³ Qualcomm CPU (2020)

⁹⁴ Microsoft HoloLens 2 Hardware (2020)

der HoloLens 2 ist somit das Handtracking und die Möglichkeit einer Echtzeit Überlagerung von Hologrammen⁹⁵.



Abbildung 33: Microsoft HoloLens 2

(Quelle: Eigene)

AR-Brillen wie die Vuzix M400 haben im Vergleich zur HoloLens 2 ein deutlich geringeres Gewicht. Die Vuzix M400 wiegt insgesamt 190 Gramm⁹⁶. Verbaut sind 6GB Arbeitsspeicher, 64GB interner Speicher und ein Eight Core 2,52Ghz Qualcomm XR1 Prozessor. Die Vuzix M400 kann wie eine gewöhnliche Brille getragen werden und erfordert im Gegensatz zur HoloLens 2 keine weitere Vorrichtung zur Befestigung am Kopf. Auch die Vuzix M400 verfügt über die Möglichkeit eine Brille unter der AR-Brille zu tragen. Ebenfalls möglich ist die Ausstattung der AR-Brille mit individuellen Brillengläsern. Bedient werden kann die Vuzix M400 anhand eines Berührungsfeldes, welches sich an der rechten Schläfe befindet. Darüber hinaus sind haptische Knöpfe an der AR-Brille angebracht. Der Bildschirm kann unterhalb des rechten Auges nach individuellem Anspruch frei ausgerichtet werden.

⁹⁵ Pohlandt (2020)

⁹⁶ Vuzix Smartglasses (2020)

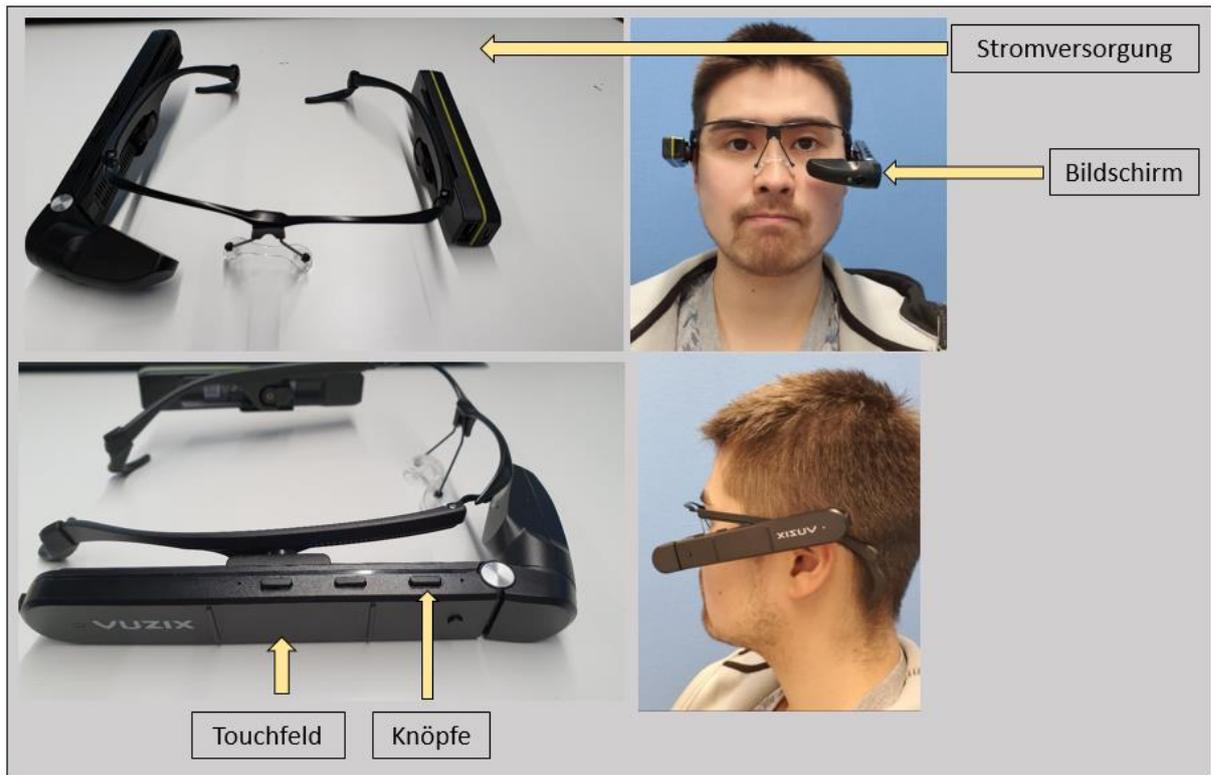


Abbildung 34: Vuzix M400

(Quelle: Eigene)

Die Vuzix Blade stellt mit 90 Gramm die leichteste der gewählten drei AR-Brillen dar. Sie besitzt 1GB Arbeitsspeicher und 8GB internen Speicher. Verbaut ist ein Quad Core ARM Prozessor⁹⁷. Die Leistung der Vuzix Blade ist somit am geringsten, ist allerdings mit nur 90 Gramm die mit Abstand leichteste AR-Brille. Dies könnte sich positiv auf den Tragekomfort der AR-Brille auswirken. Der integrierte Bildschirm der Vuzix Blade befindet sich im rechten Glas der AR-Brille und ist statisch, kann also im Vergleich zur Vuzix Blade nicht in der Position verändert werden und ist aufgrund der Positionierung dauerhaft sichtbar. Die Steuerung der Vuzix Blade ist nur auf Basis eines Berührungsfeldes im Bereich der rechten Schläfe möglich.

⁹⁷ Vuzix Smartglasses (2020)



Abbildung 35: Vuzix Blade

(Quelle: Eigene)

Die Microsoft HoloLens 2 stellt das eine Extrem des Spektrums dar, da diese AR-Brille hardwaretechnisch am besten ausgestattet ist und somit als einzige in der Lage ist, Augmentierungen in Form von dreidimensionalen Hologrammen in Echtzeit abzubilden. Gleichzeitig ist das Gewicht dieser AR-Brille am höchsten. Das andere Extrem ist die Vuzix Blade. Das Gewicht ist am geringsten, die Leistung jedoch auch. Die Vuzix M400 stellt einen Kompromiss zwischen den beiden Extremen dar. Das Gewicht befindet sich im Vergleich zu den anderen AR-Brillen im Mittelfeld. Ebenso stellt auch die hardwaretechnische Ausstattung ein Mittelmaß der anderen AR-Brillen dar. Somit können durch die Auswahl der beschriebenen AR-Brillen verschiedene als wichtig erachtete Faktoren wie Gewicht, Leistung und Bedienung in unterschiedlichen Kombinationen bedient und erprobt werden. Die Handhabung aller AR-Brillen ist ohne ein separates Eingabegerät möglich und wird im Falle der Vuzix Blade durch ein Berührungsfeld, bei der Vuzix M400 durch ein Berührungsfeld und Knöpfen und bei der HoloLens 2 durch Knöpfe in Formen von Hologrammen ermöglicht. Der Grund dafür ist, dass ein separates Eingabegerät den in Abschnitt 3.1.2 erläuterten Vorteil der freihändigen Bedienung einer AR-Brille aufheben würde. Des Weiteren war die kabellose Anwendung von großer Bedeutung, da ein zusätzliches Kabel eine potentielle Gefahrenquelle darstellen könnte.

3.3 Konzepte

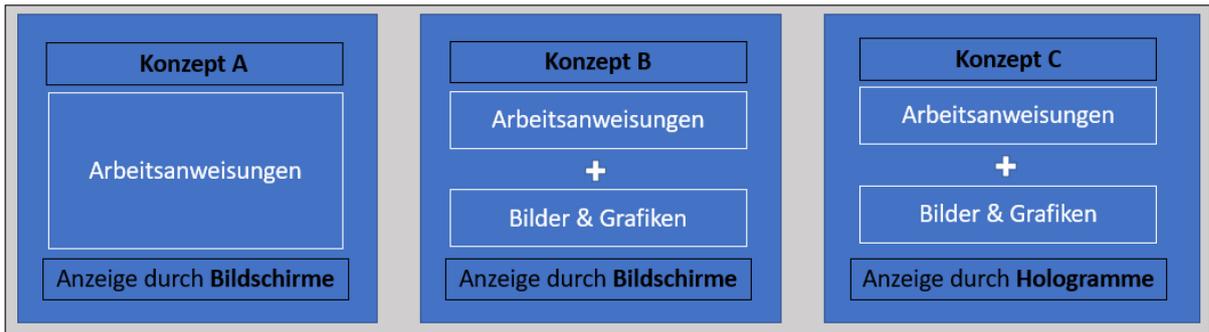


Abbildung 36: Konzeptübersicht

(Quelle: Eigene)

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei aufeinander aufbauende Ansätze mit verschiedenen dafür geeigneten AR-Brillen getestet. Abbildung 36 veranschaulicht die drei Konzepte, die im Folgenden beschrieben werden. Die einfachste Möglichkeit einen Kontrolleur bei seiner Arbeit zu unterstützen besteht darin, Daten der Analysesoftware in Form von Textinformationen dauerhaft im Sichtfeld des Kontrolleurs anzuzeigen. Durch die dauerhafte Anzeige der Informationen müssen diese nicht verinnerlicht werden und können vom Kontrolleur schrittweise abgearbeitet werden. Da die Analysesoftware, wie in Abbildung 30 beschrieben, auch Aufnahmen von den zu kontrollierenden Bauteilen macht und diese markiert beziehungsweise hervorhebt, ist Konzept A nicht in der Lage das Softwaresystem komplett zu ersetzen, da eine Bildanzeige nicht ermöglicht wird. Dennoch ist Konzept A zu untersuchen, da beispielsweise erfahrene Kontrolleure bereits durch Textinformationen die vorgesehene Kontrolle durchführen könnten. Die Beobachtung, dass der Einfluss von AR-Hilfsmitteln je nach Erfahrung des Anwenders unterschiedlich ist, wurde in Kapitel 2.4.2 im Versuch von Sanna et al beschrieben⁹⁸. Ein weiterer Grund für die Überprüfung von Konzept A ist, dass aufgrund der geringen Voraussetzung der Leistung der AR-Brille ein Modell mit geringem Gewicht gewählt werden kann. Da die Akzeptanz der AR-Brille von den Kontrolleuren eine große Rolle spielt und diese durch eine leichtere und somit komfortablere AR-Brille begünstigt werden sollte, ist das geringe Gewicht ein Vorteil. Für die Überprüfung von Konzept A bieten sich daher sowohl die Vuzix M400 als auch die Vuzix Blade an. Die HoloLens 2 wird für Konzept A nicht berücksichtigt, da die zu testende Anwendung keine nennenswerten Leistungsanforderung stellt, und die HoloLens 2 somit keinen Vorteil gegenüber den leichteren Brillen von Vuzix erzielen kann.

Konzept B erweitert Konzept A dahingehend, dass neben der Textinformation auch ein 2D Bild angezeigt werden soll. Somit umfasst Konzept B die gesamten Informationen der

⁹⁸ Sanna et al. (2015) S. 1f

Analysesoftware, die vorher auf einem separaten Bildschirm angezeigt wurden und wäre in der Lage, die Analysesoftware potenziell zu ersetzen. Die zusätzliche Bilddarstellung benötigt zusätzliche Leistung von der AR-Brille. Jedoch ist die Anzeige eines 2D Bildes mit modernen AR-Brillen ohne weiteres möglich⁹⁹. Für die Überprüfung von Konzept B werden aus denselben Gründen wie bei Konzept A lediglich die Vuzix Blade und die Vuzix M400 eingesetzt.

Konzept C erweitert Konzept B in dem Sinne, dass sowohl Textinformation, Bildmaterial und Markierungen am Prüfgegenstand in Echtzeit angezeigt werden sollen. Darüber hinaus handelt es sich bei Konzept C im Gegensatz zu Konzept A und B um einen Ansatz, in dem alle Informationen mithilfe von dreidimensionalen Hologrammen dargestellt werden. Es handelt sich hierbei also um 3D Objekte, die im Raum verankert werden sollen und nicht um 2D Bilder, die lediglich auf einem Bildschirm angezeigt werden. Die Textinformation soll neben dem Prüfgegenstand augmentiert werden, sodass diese während der Kontrolle sichtbar ist. Markierungen und Pfeile sollen ebenfalls über das Kurbelgehäuse augmentiert werden, wodurch die Kombination von Textinformation und Markierungen eine präzise Entscheidung über den folgenden Arbeitsschritt getroffen werden kann. Eine Echtzeit 3D Überlagerung ist im Vergleich zu einer statischen 2D Bildanzeige deutlich anspruchsvoller und benötigt daher eine AR-Brille mit genügend Ressourcen¹⁰⁰. Die HoloLens 2 bietet diese Möglichkeit. Die Problematik bei diesem Konzept liegt in der Akzeptanz des Kontrolleurs, die aus der Kosten-Nutzen-Abwägung zwischen Komfort und Hilfestellung besteht.

Während einer Besprechung mit dem Auftraggeber der Forschung, in der die drei Basiskonzepte dem Auftraggeber vorgestellt wurden, stellte sich heraus, dass die reine Anzeige von Text, wie sie in Konzept A geplant wurde, grundsätzlich als „nicht hilfreich“ eingestuft wurde. Erst die Kombination von Text und Bild sei im vorliegenden Anwendungsfall sinnvoll. Daher wird Konzept A nicht separat getestet. Somit werden Konzept B von der Vuzix Blade und der Vuzix M400 überprüft und Konzept C von der HoloLens 2.

3.4 Erfolgskriterien des Versuchs

Im Rahmen des Versuchs soll die generelle Akzeptanz und Sinnhaftigkeit der AR-Brille in der Endkontrolle der Kurbelgehäuse von den Teilnehmern des Versuchs subjektiv bewertet werden. Bewertet werden Faktoren, die sich auf die Akzeptanz und Sinnhaftigkeit auswirken können. Die im Rahmen eines Fragebogens zu stellenden Fragen fokussieren sich daher auf den Grad der Unterstützung, der Sichtfeldeinschränkung, dem Tragekomfort und der Bedienungsfähigkeit der AR-Brille.

⁹⁹ Pohlandt (2020)

¹⁰⁰ Pohlandt (2020)

Der Grad der Unterstützung

Der Grad der Unterstützung soll widerspiegeln, inwiefern der Kontrolleur sich grundsätzlich durch die AR-Brille unterstützt fühlt. Erfragt wird daher eine subjektive Einschätzung jedes Probanden. Anhand der Ergebnisse kann dann evaluiert werden, inwiefern die AR-Brille grundsätzlich geeignet ist, den Prüfprozess zu unterstützen.

Der Grad der Sichtfeldeinschränkung

Eine Sichtfeldeinschränkung ist durch ein HMD grundsätzlich gegeben, da die AR-Brille ein HMD ist. Der Bildschirm befindet sich somit zwangsläufig vor oder in der Nähe der Augen des Kontrolleurs, wodurch ein gewisser Grad der Sichtfeldeinschränkung nicht vermeidbar, beziehungsweise zwangsläufig gegeben ist. Allerdings variiert der Grad der Sichtfeldeinschränkung dadurch, dass die verschiedenen ausgewählten AR-Brillen eine andere Positionierung der Bildschirme besitzen. Anhand der Befragung soll herausgefunden werden, welche Form der Sichtfeldeinschränkung von den Probanden als störend beziehungsweise nicht oder weniger störend empfunden werden.

Der Tragekomfort

Der Tragekomfort einer AR-Brille ist ebenfalls ein sehr entscheidendes Erfolgskriterium, da die AR-Brille während des gesamten Prüfprozesses getragen und nicht nur bei Bedarf aufgesetzt werden soll. Während der gesamten Schicht, die der Kontrolleur ableisten muss, sind lediglich vereinzelte Pausen vorgesehen. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass die AR-Brille oft 3 bis 4 Stunden am Stück getragen werden muss. Der Tragekomfort der jeweiligen AR-Brillen ist daher von hoher Bedeutung.

Bedienungsfähigkeit

Schlussendlich ist die Bedienungsfähigkeit beziehungsweise die Benutzerfreundlichkeit ein entscheidender Erfolgsfaktor. Während der Kontrolle stehen die Kontrolleure grundsätzlich unter Zeitdruck. Für die vollständige Kontrolle eines Kurbelgehäuses sind nur wenige Minuten vorgesehen. Um in diesem engen Zeitfenster die Kontrolle abschließen zu können, muss die AR-Brille über eine intuitive und schnelle Bedienung verfügen, um als hilfreiches Mittel angesehen zu werden. Da alle AR-Brillen leicht verschiedene, beziehungsweise abgewandelte Bedienungsmöglichkeiten bieten, ist anhand des Kriteriums der Bedienungsfähigkeit abzuwägen, welche dieser Möglichkeiten am geeignetsten ist.

Durch die Bewertung der zuvor beschriebenen Kriterien durch die Kontrolleure, können sowohl die grundsätzliche Akzeptanz und Sinnhaftigkeit einer AR-Brille, als auch Kriterien der jeweiligen AR-Brillen eingeholt werden. Die Kriterien der AR-Brillen sind daher wichtig, da im Falle einer Ablehnung der AR-Brille bestimmt werden kann, welche Faktoren und Eigenschaften einer AR-Brille den Kontrolleur am meisten gestört haben. Durch dieses Wissen könnten in zukünftigen Versuchen neue und verbesserte AR-Brillen getestet werden, welche diese Kriterien dann erfüllen könnten. Wiederum wäre ein erneuter Versuch mit AR-Brillen unnötig, sofern die AR-Brille grundsätzlich als ungeeignetes Hilfsmittel im spezifischen Anwendungsfall angesehen wird.

3.4.1 Implementierung der Konzepte

Um die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Konzepte zu überprüfen, müssen Testapplikationen für die jeweiligen AR-Brillen implementiert werden. Diese werden dann im Rahmen eines Versuchs mit Kontrolleuren von den Werken der Mercedes-Benz AG getestet. In den folgenden Abschnitten werden die Implementierungen der Testapplikation für die Vuzix Blade, Vuzix M400 und Microsoft HoloLens 2 beschrieben. Die Implementierung der Testapplikationen wird mit Unity durchgeführt. Die Unity Engine ist eine Spiel-Engine, beziehungsweise eine Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für Spiele. Die Software wird von dem US-amerikanischen Unternehmen Unity Technologies entwickelt und ermöglicht die Entwicklung von Spielen und interaktiven Applikationen für verschiedenste Plattformen wie beispielsweise Android, iOS, Windows und weitere¹⁰¹.

3.4.2 Vuzix Blade und Vuzix M400 Implementierung

Die Umsetzungen von Konzept B kann auf zweierlei Weisen geschehen. Zum einen besteht die Möglichkeit Text und Bild statisch im Sichtfeld des Kontrolleurs anzuzeigen. Die Augmentierung würde in diesem Fall nicht an ein physisches Objekt verankert werden, sondern statisch auf dem Bildschirm der AR-Brille ausgegeben werden.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, das Kurbelgehäuse oder einen Marker zu tracken, zu dessen relativen Position dann Text und Bild am Kurbelgehäuse oder Marker verankert werden. Dieser Ansatz erfordert Echtzeit Tracking, welches im Softwaredevelopmentkit Vuforia¹⁰² implementiert ist und in ein Unity Projekt importiert werden kann. Während der Entwicklungsphase wurden beide Ansätze getestet. Das Echtzeit Tracking mithilfe von Vuforia stellte sich schnell als ungeeignet dar, weil das augmentierte Bild nicht zuverlässig an derselben Position verankert blieb und darüber hinaus ein unangenehmes Flimmern aufwies.

¹⁰¹ Unity Technologies (2021)

¹⁰² Vuforia (2021)

Des Weiteren ist die feste Verankerung der Augmentierung anhand des Markers oder des Kurbelgehäuses gegenüber einer statischen Anzeige, die im Falle eines Fokuswechsels trotzdem im Sichtfeld des Kontrolleurs, vorteilhaft. Der Grund dafür besteht darin, dass der Kontrolleur alle für die Kontrolle notwendigen Informationen permanent im Sichtfeld hat, wohingegen bei einer Verankerung im Raum die Informationen nur so lange im Sichtfeld bleiben, bis der Kontrolleur sich dem Prüfgegenstand aktiv zuwendet.

Für die finale Testapplikation wurde aus den geschilderten Gründen daher auf Echtzeit Tracking verzichtet und eine statische Anzeige von Text und Bildern gewählt. Des Weiteren wurde eine Benutzeroberfläche entwickelt, die mittels eines Berührungsfeldes beziehungsweise im Falle der Vuzix M400 zusätzlich mit Knöpfen navigierbar ist. Der Kontrolleur ist somit in der Lage, zwischen mehreren zur Kontrolle notwendigen Bildern zu wechseln. Des Weiteren kann der Kontrolleur Informationen und Bilder bereits kontrollierter Kurbelgehäuse erneut aufrufen, indem „Letztes KG“ aufgerufen wird. Dann stehen erneut alle Bilder des zuvor geprüften Kurbelgehäuses zur Verfügung.

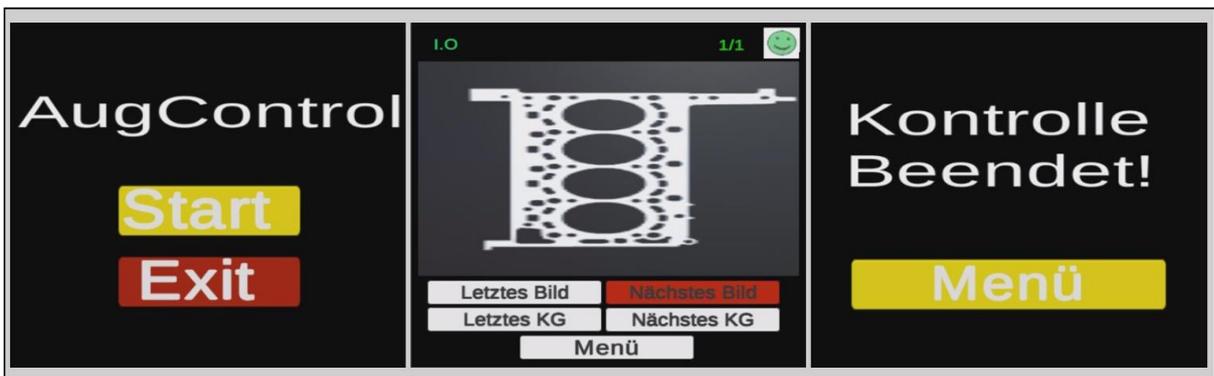


Abbildung 37: AugControl: Startszene - Kontrollszene - Endszene

(Quelle: Eigene)

In Abbildung 37 ist der Anfangsbildschirm, die Kontrolle und der Bildschirm nach erfolgreicher Kontrolle angezeigt. Die Applikation wird im Folgenden als „AugControl“ bezeichnet. Nach Aufsetzen der AR-Brille und dem Auswählen der Applikation „AugControl“ wird das Hauptmenü geladen. Durch Tippen auf dem Berührungsfeld oder Betätigen des Knopfes auf der AR-Brille wird die Kontrolle gestartet und die Kontrollszene geladen. Durch die Kontrollszene werden dem Kontrolleur Bilder und Textinformationen angezeigt. Nach erfolgreicher Beendigung der Kontrolle kann durch das Betätigen der Schaltfläche „Nächstes KG“ das nächste Kurbelgehäuse und dessen Informationen geladen werden. Die in Abbildung 37 gezeigte Kontrollszene zeigt einen Fall, in welchem keine Probleme am Kurbelgehäuse festgestellt wurden. Daher ist die Schrift grün und in der Fehlerbeschreibung „I.O“ angegeben, was für „In Ordnung“ steht. In Abbildung 38 ist ein Kurbelgehäuse mit vorab erkannten Problemen abgebildet. Des Weiteren werden alle Komponenten der Kontrollszene genauer

beschrieben. In der linken oberen Ecke befindet sich die Fehlerbeschreibung. Diese gibt dem Kontrolleur an, welcher Teil des Bauteils einen Fehler aufweist. Direkt darunter ist eine Abbildung des Kurbelgehäuses angezeigt, welche mithilfe einer roten Markierung den in der Fehlerbeschreibung erwähnten Problem optisch hervorhebt. Darunter befindet sich die Benutzeroberfläche, welche aus insgesamt 5 Knöpfen: „Letztes Bild“, „Nächstes Bild“, „Letztes KG“, „Nächstes KG“ und „Menü“ besteht. In der rechten oberen Ecke befindet sich der Schnellindikator. Falls ein Kurbelgehäuse mindestens 1 Problem aufweist, ist die Farbe für die Fehlerbeschreibung, Fehlerzahl und des Schnellindikators rot. Falls ein Kurbelgehäuse keine Probleme aufweist wie in Abbildung 38, ist die gewählte Farbe für Schrift und Schnellindikator grün. Die Farben Rot und Grün wurden bewusst ausgewählt und an eine Ampel angelehnt. Rot steht hierbei für „Stopp“ beziehungsweise „Problem“ und Grün steht für „Gehen“ beziehungsweise „Alles in Ordnung“. Links neben dem Schnellindikator befindet sich die Fehlerzahl, die angibt, wie viele Fehler von der Software erkannt wurden. Zu jedem Fehler existiert ein eigenes Anzeigebild. Dadurch weiß der Anwender wie viele Fehler beziehungsweise Bilder noch vorhanden sind.

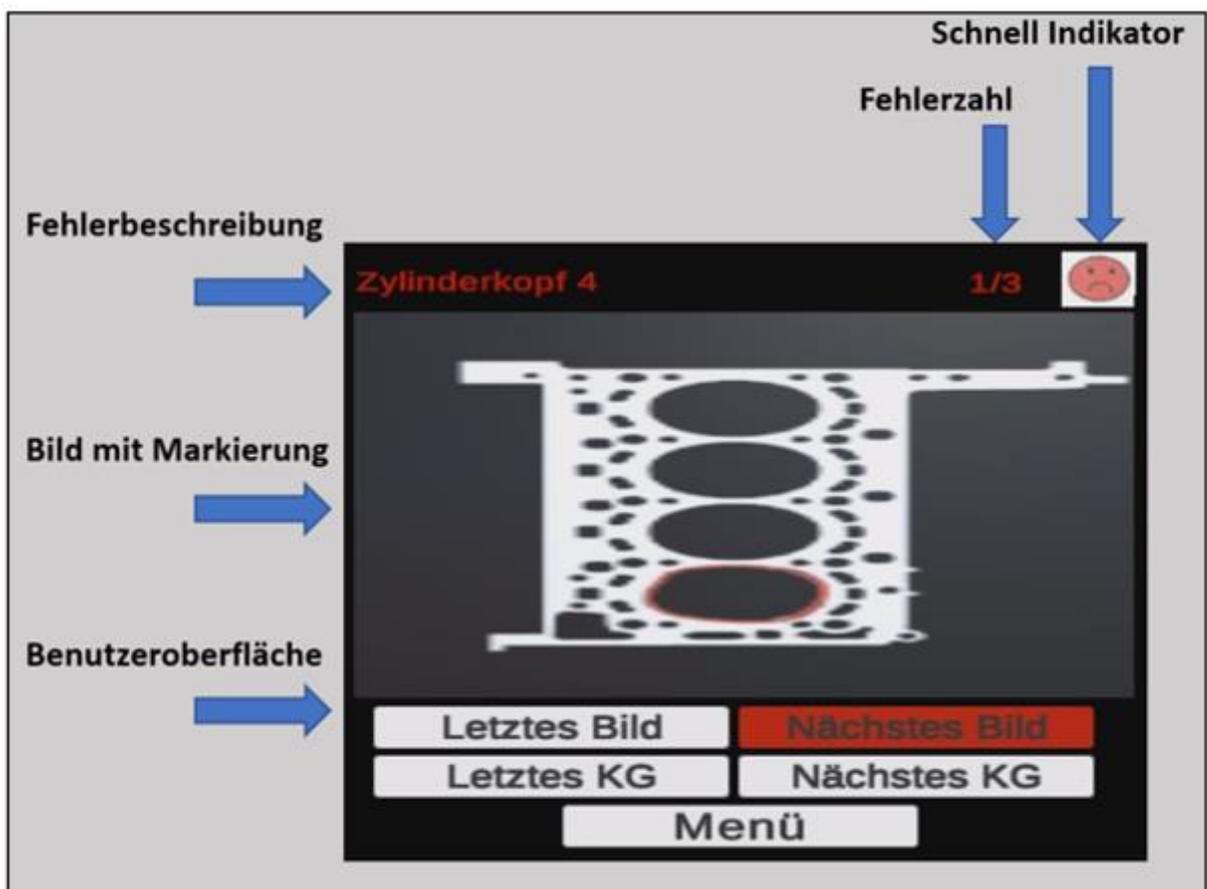


Abbildung 38: AugControl - Kurbelgehäuse mit erkannten Problemen

(Quelle: Eigene)

3.4.3 Microsoft HoloLens 2 Implementierung

„AugControl“ soll im Rahmen der HoloLens 2 Implementierung überprüfen, ob eine überlagerte Augmentierung von Markierungen wie Pfeilen oder Kreisen am Kurbelgehäuse und die Anzeige von Text und Bild Informationen als hilfreicher Mittel angesehen werden als Konzept B. Die Augmentierung soll während der gesamten Kontrolle immer an der richtigen Position angezeigt werden. Da das Kurbelgehäuse während der Kontrolle auch im Rhönrad gedreht werden kann, reicht ein normaler Marker zur Orientierung nicht aus, weil dieser verdeckt werden könnte. Das Anbringen mehrerer Marker wäre zwar grundsätzlich möglich, erhöht aber gleichzeitig den Arbeitsaufwand. Daher soll für die HoloLens 2 Implementierung von „AugControl“ ein Model-Based Tracking verwendet werden. Anhand der CAD Daten des Kurbelgehäuses kann dieses in Echtzeit aus verschiedenen Winkeln getrackt werden. Zur Implementierung der HoloLens 2 Applikation wird das Softwaredevelopmentkit Mixed Reality Toolkit (MRTK)¹⁰³ in Verbindung mit Vuforia für das Model-Based Tracking in Unity eingebunden. Während des Entwicklungsprozesses kam es vermehrt zu Versionsinkompatibilitäten zwischen der MRTK-, Vuforia- und Unity Version. Schlussendlich wurde die Unity Version 2019.4.16f1 in Verbindung mit MRTK 2.4.0 und der Vuforia Version 9.6.4 verwendet.

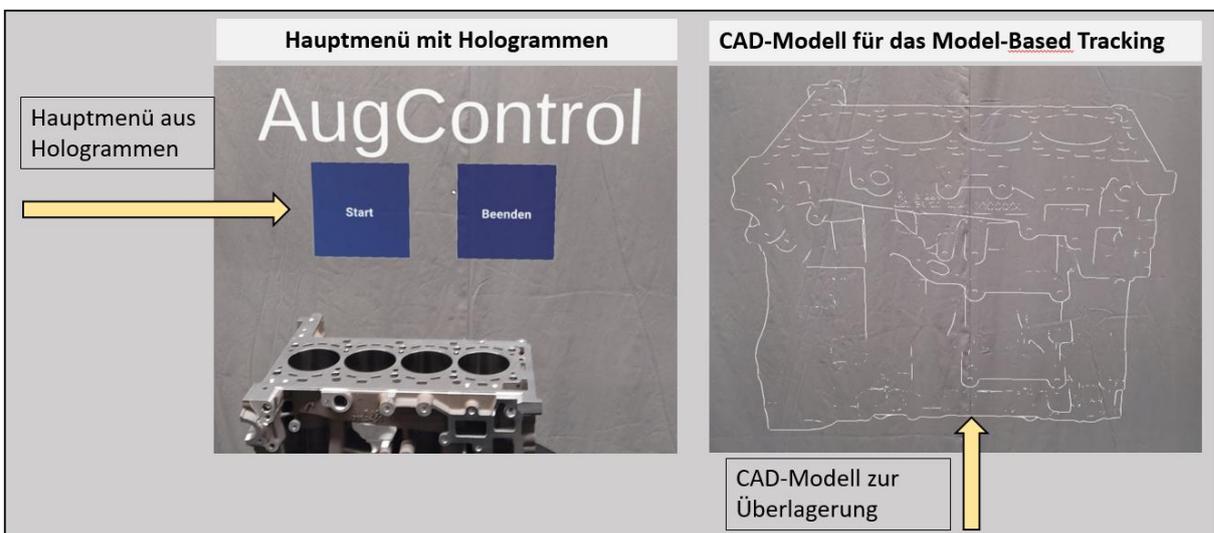


Abbildung 39: Links AugControl Startmenü - Rechts Model-Based Tracking Raster des Kurbelgehäuses

(Quelle: Eigene)

Auf der linken Seite der Abbildung 39 ist das Hauptmenü von „AugControl“ als HoloLens 2 Applikation zu sehen. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Implementierungen ist das

¹⁰³ Microsoft Mixed Reality Toolkit (2021b)

Menü der HoloLens 2 dreidimensional. Sowohl der Schriftzug „AugControl“, als auch die zwei Knöpfe des Hauptmenüs sind Hologramme, welche fest im Raum verankert sind. Durch das Betätigen der Schaltfläche „Start“ wird die Applikation gestartet. Nach einer kurzen Wartezeit erscheint das in Abbildung 39 rechts zu sehende Model Tracking Raster, welches auf Basis der CAD-Daten des Kurbelgehäuses mit der Applikation „Model Target Generator“ erstellt wurde. Die Applikation „Model Target Generator“ ist ein Programm von Vuforia, mit dessen Hilfe CAD-Daten für das Model Tracking aufbereitet werden können und in Unity importierbar gemacht werden. Durch die Ausrichtung des Rasters mit einem Kurbelgehäuse derselben Art, wird bei erfolgreichem Tracking die Kontrollansicht angezeigt. Die Kontrollansicht ist in Abbildung 40 zu sehen.

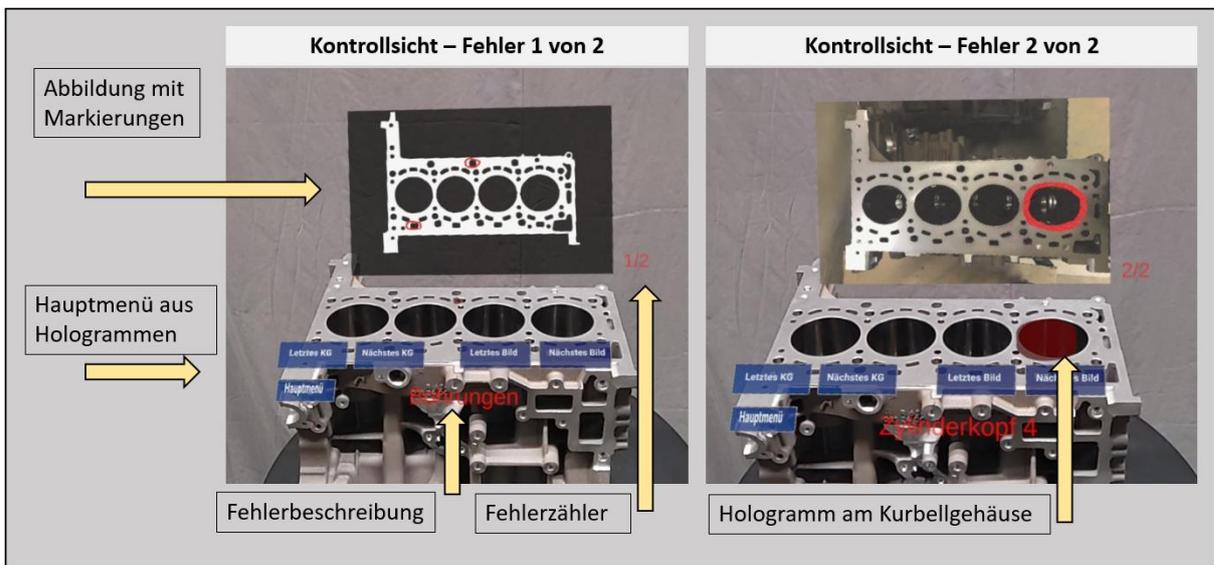


Abbildung 40: Links Kontrollansicht mit Fehler 1 - Rechts Kontrollansicht mit Fehler 2

(Quelle: Eigene)

Auf der linken Seite der Abbildung 40 ist ein Szenario abgebildet, in dem der Kontrolleur anhand der Abbildung und der Markierungen zwei Fehler betrachten soll, die dem Kontrollsystem aufgefallen sind. Die Fehlerbeschreibung „Bohrungen“ wird unterhalb des Menüs ausgegeben. In diesem Fall sind zwei Bohrungen zu prüfen. Das Menü besteht auch in dieser Implementierung von AugControl aus „Letztes KG“, „Nächstes KG“, „Letztes Bild“, „Nächstes Bild“ und „Hauptmenü“. Die Funktionen sind identisch zu den Implementierungen aus Kapitel 3.3.2. Rechts neben der Abbildung ist ein Fehlerzähler dargestellt, der den Kontrolleur über die Gesamtzahl an Abbildungen und Fehler informiert. Durch das Drücken der Schaltfläche „Nächstes Bild“, gelangt der Kontrolleur zu der in Abbildung 40 rechts abgebildeten Situation. Der Fehlerzähler zeigt jetzt „2/2“ an, wodurch der Kontrolleur weiß, dass keine weiteren Bilder beziehungsweise Fehler mehr folgen und dies der letzte zu kontrollierende potenzielle Fehler ist. In diesem Fall wird der „Zylinderkopf 4“ als Fehler erkannt. Die Augmentierung ist hier aufgrund der Größe der Markierung gut zu erkennen.

3.5 Versuch im Werk

Auf Basis der in 3.3.1 beschriebenen Testapplikationen kann der Versuch in der Mercedes-Benz Werkshalle in Untertürkheim getestet werden. Für den Versuch wurde ein eigens dafür hergerichteter Bereich des Werkes ausgewählt. Der Aufbau des Versuchs ahmt eine typische Situation in der Endkontrolle nach. Einfachheit halber ist das Kurbelgehäuse bereits im Rhönrad fixiert und ist bereit zur Endkontrolle. Die Probanden haben die Aufgabe zunächst Konzept B mit der Vuzix Blade und Vuzix M400 zu testen. Konzept C wird mit der HoloLens 2 im Anschluss getestet. Nach der Absolvierung aller Versuchsdurchgänge werden die Ergebnisse in Form eines Fragebogens eingeholt, um die Erfolgskriterien auswerten zu können.

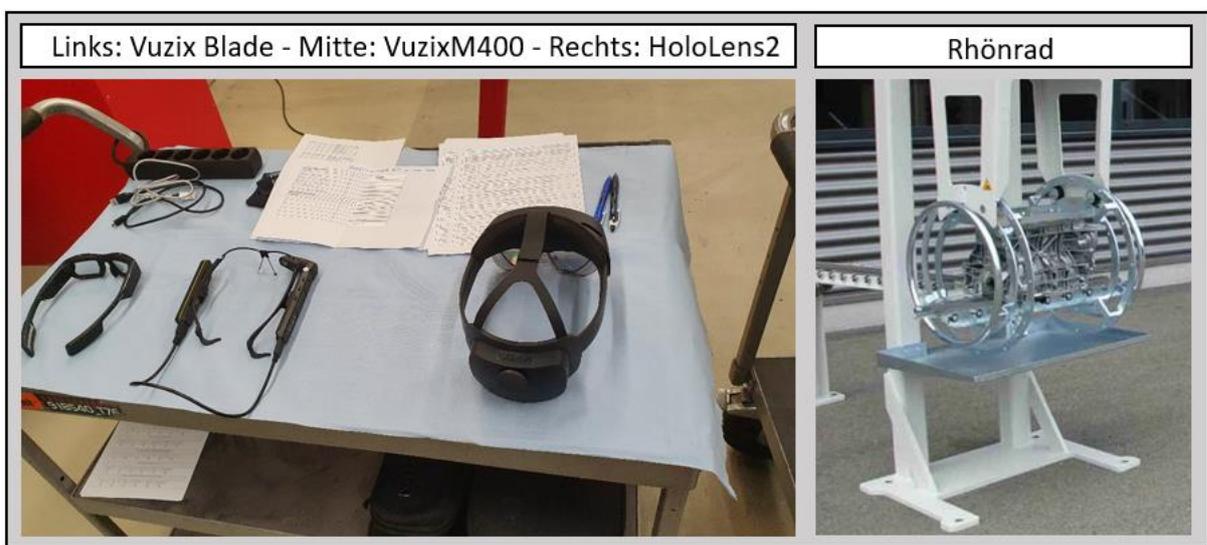


Abbildung 41: Versuchsaufbau des Pilotversuchs in Untertürkheim am 26.01.2021¹⁰⁴

(Quelle: Links: Eigene - Rechts: ematec 2021)

In Abbildung 41 ist die Umgebung des Pilotversuches zu sehen. Links sind die drei zu testenden AR-Brillen zu sehen, bestehend aus der Vuzix Blade, Vuzix M400 und der Microsoft HoloLens 2. Der weitere Versuchsaufbau, bestehend aus einem in ein Rhönrad eingespannten Kurbelgehäuses, ist mit dem in Abbildung 41 rechts zu sehenden Aufbau vergleichbar. Durch die Einspannung des Kurbelgehäuses in das Rhönrad kann im Versuch ein realistisches Szenario nachgestellt werden. Das Rhönrad ermöglicht die vertikale und horizontale Drehung des Kurbelgehäuses, um potentielle Fehler aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten zu können. Aufgrund der COVID-19-Pandemie musste der Testversuch auf zwei Tage verteilt werden, um das Ansteckungsrisiko zu minimieren. Pro Versuchstag nahmen jeweils 5 Mitarbeiter des Werkes an dem Versuch teil, wodurch insgesamt 10 Probanden am Versuch teilnehmen konnten. Bei den Probanden handelt es sich ausschließlich um ausgebildete

¹⁰⁴ Ematec (2021)

Kontrolleure von Kurbelgehäusen. Alle Probanden waren Männlich und die Altersgruppen durchwachsen. 4 Probanden waren zwischen 18 und 30 Jahren alt, 2 Probanden waren zwischen 31 und 43 Jahren alt, 3 Probanden waren zwischen 44 und 56 Jahren alt und 1 Proband befand sich in der Altersklasse über 56. Des Weiteren waren 2 Probanden Brillenträger. Ansonsten wurden keine weiteren Angaben zu Sehstörungen oder Seheinschränkungen getätigt. 3 der 10 Probanden hatten darüber hinaus bereits Erfahrung mit einer AR-Brille gemacht. Erfahrungen wurden einheitlich im Bereich der Unterhaltung in Form von Spielen gemacht.

Jeder Proband erhielt vor Beginn des Pilotversuches eine kurze Unterweisung, die aus einer Demonstration der Anbringung der jeweiligen AR-Brille und den jeweiligen Steuerungsmöglichkeiten bestand. Der Proband hatte anschließend 5 Minuten Zeit, um die Testapplikation anhand des bereitgestellten Kurbelgehäuses zu testen und einen ersten Eindruck über die Funktionalitäten, Komfort und Bedienungsmöglichkeiten der jeweiligen AR-Brille zu erhalten. Begonnen wurde der Versuch mit der Vuzix Blade, folgend mit der Vuzix M400 und schlussendlich mit der Microsoft HoloLens 2. Nachdem der Proband alle AR-Brillen getestet hatte, wurde ein Fragebogen (vgl. 7.3) ausgeteilt. Im Folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Pilotversuches auf Basis der Antworten des Fragebogens erläutert und in Form von Diagrammen veranschaulicht.

4. Präsentation und Analyse der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Testversuches, die anhand eines Fragebogens eingeholt wurden, erläutert, visualisiert und im Anschluss analysiert. Anhand der Ergebnisse wird ein allgemeingültiger Schluss gezogen, der für zukünftige Forschungen als relevante Erkenntnis dienen kann.

4.1 Ergebnisse des Testversuchs

Die erste Frage, die vom Probanden zu beantworten war, befasste sich mit der Einschätzung des Probanden darüber, ob die Einführung der jeweils getesteten AR-Brille als unterstützende Maßnahme gewertet wird oder nicht. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der 10 Probanden. Die Y-Achse gibt die abgegebene Bewertung der Probanden in Abhängigkeit der getesteten AR-Brille an, welche in einem ganzzahligen Intervall von „Sehr Gut - 1“ bis „Sehr Schlecht - 6“ verläuft. Auffällig ist die Tatsache, dass der Bereich unterhalb von „Eher Schlecht - 4“ bis „Sehr Schlecht - 6“, flächenmäßig größer ist als der obere Bereich zwischen „Eher Gut - 3“ und „Sehr Gut - 1“. Eine Betrachtung der Antwortmöglichkeiten in Schulnoten ermöglicht eine konkrete Durchschnittsberechnung, da die Skala bei allen Fragen von 1 bis 6 gewählt wurde. Dadurch werden für jede Fragestellung immer zwischen 10 und 60 Punkten vergeben, da jede Frage einen Wert zwischen 1 und 6 erhält und von 10 Probanden vergeben wird. Je mehr Punkte vergeben wurden, desto schlechter die resultierende Bewertung.

Bildet man den Durchschnitt der Antworten der ersten Frage bezüglich des Unterstützungsgrades der jeweiligen AR-Brille, so erhält man für die Vuzix Blade einen Durchschnittswert von 4,9. Dieser entspricht aufgerundet einer durchschnittlichen Bewertung von „Schlecht - 5“. Sowohl Proband 5, als auch Proband 6 und 9 gaben der Vuzix Blade die schlechteste Note „Sehr Schlecht - 6“. Betrachtet man ebenfalls die Durchschnittswerte der Vuzix M400 und HoloLens 2, ist feststellbar, dass die Vuzix M400 mit einem Durchschnittswert von 3,9 „Eher Schlecht“ das Mittelfeld abbildet. Die HoloLens 2 hat im Durchschnitt die beste Bewertung mit 3,5. Diese entspricht einer Bewertung zwischen „Eher Gut - 3“ und „Eher Schlecht - 4“. Die HoloLens 2 erhielt als einzige AR-Brille die Bestnote „Sehr Gut - 1“ und erzielte ebenfalls zweifach die 2. beste Note „Gut - 2“.

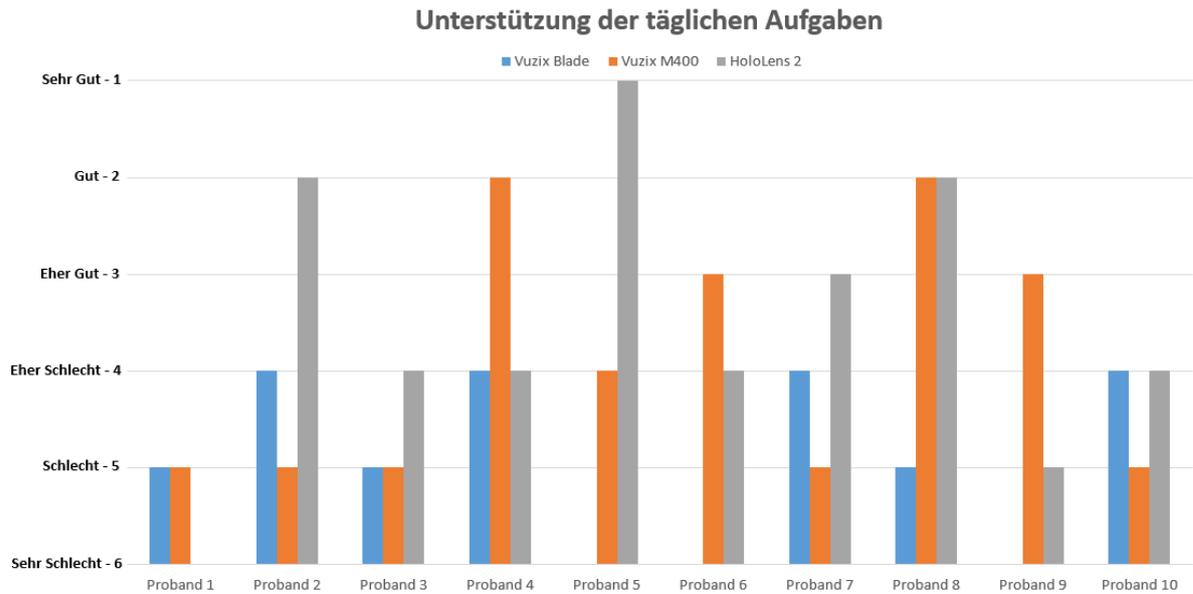


Abbildung 42: Unterstützungsgrad der AR-Brille bei der täglichen Anwendung

(Quelle: Eigene)

Die zweite Frage des Fragebogens, in welcher bewertet werden sollte, für wie sinnvoll die Einführung der getesteten AR-Brille erachtet wird, diente als Kontrollfrage zur ersten Frage, da die Sinnhaftigkeit kausal mit dem Grad der Unterstützung verknüpft ist. Die Ergebnisse waren bis auf vereinzelte geringfügige Abweichungen identisch.

Die dritte zu beantwortende Frage verlangte von den Probanden den Komfort der jeweiligen AR-Brille zu bewerten. Abbildung 43 zeigt eine Visualisierung der Ergebnisse.

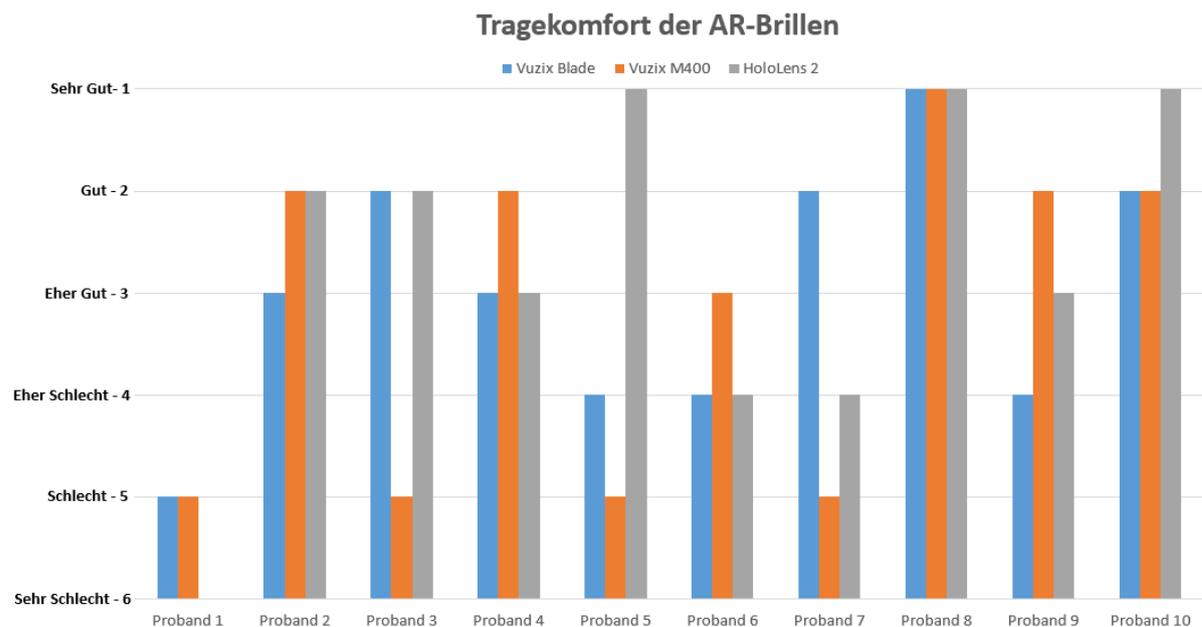


Abbildung 43: Tragekomfort der AR-Brillen im Vergleich

(Quelle: Eigene)

Der Tragekomfort der AR-Brillen wurde im Vergleich zu Frage 1 und 2 insgesamt besser bewertet. Beispielsweise gab Proband 8 sämtlichen AR-Brillen die Bestnote „Sehr Gut - 1“. Auch Proband 10 und Proband 2 bewerteten den Komfort als durchschnittlich „Gut - 2“. Lediglich Proband 1 bewertete den Komfort aller AR-Brillen mit „Schlecht - 5“ und als einziger auch mit „Sehr Schlecht - 6“. Die HoloLens 2 erhielt im Durchschnitt 27 Punkte, dicht gefolgt von der Vuzix Blade mit 30 Punkten und der Vuzix M400 mit 32 Punkten. Entsprechend ist der Komfort der getesteten AR-Brillen auf einem ähnlich hohen Niveau, welches grundsätzlich mit „Eher Gut - 3“ bewertet werden kann. Das beste Ergebnis wurde somit von der HoloLens 2 erzielt, gefolgt von der Vuzix Blade und der Vuzix M400.

Frage 4 beschäftigte sich mit dem Grad der Sichtfeldeinschränkung, die der Proband durch das Aufsetzen der AR-Brille in Kauf nehmen musste. Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse in visualisierter Form.

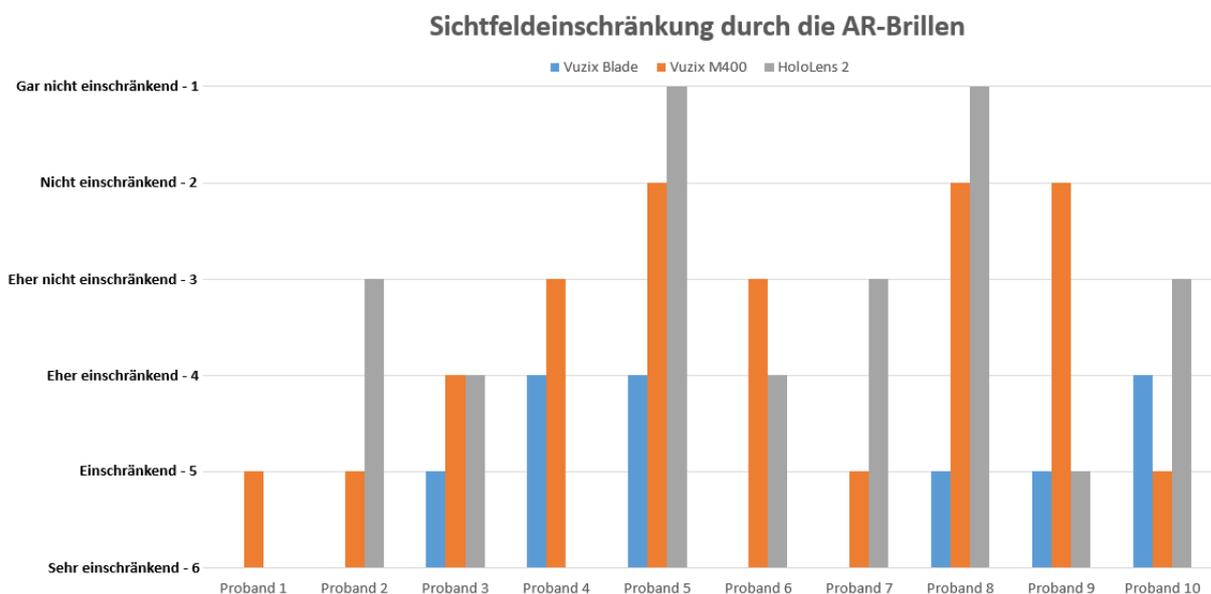


Abbildung 44: Sichtfeldeinschränkung durch das Aufsetzen der AR-Brille

(Quelle: Eigene)

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass die Vuzix Blade die mit Abstand einschränkendste AR-Brille darstellt. Insgesamt erhielt die Vuzix Blade vier Mal die schlechteste Note „Sehr einschränkend - 6“ und weitere drei Mal die Note „Einschränkend - 5“. Die verbliebenden 3 Probanden bewerteten die Sichteinschränkung durch die Vuzix Blade mit „Eher einschränkend - 4“. Im Durchschnitt erhielt die Vuzix Blade 51 Punkte, was einer durchschnittlichen Bewertung von „Einschränkend - 5“ entspricht. Die Vuzix M400 und die HoloLens 2 schneiden im Vergleich besser und auf identischem Niveau ab. Beide AR-Brillen erhielten im Durchschnitt 36 Punkte, was einer Bewertung zwischen „Eher nicht einschränkend - 3“ und „Eher einschränkend - 4“ entspricht, wobei die Tendenz des Ergebnisses in Richtung „Eher einschränkend - 4“ geht. Auffällig ist, dass die HoloLens 2 von Proband 5 und Proband 8 als

„Gar nicht einschränkend - 1“ bewertet wurde. Die Vuzix M400 erhielt ebenfalls von Proband 2 und 5 die Note „Nicht einschränkend - 2“ und von Proband 9 ebenfalls die Note „Nicht einschränkend - 2“.

Frage 5 beschäftigte sich mit dem Gewicht der AR-Brille und stellte eine Kontrollfrage zu Frage 3 dar, die sich mit dem Komfort auseinandergesetzt hat. Auch bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Frage zeigte sich, dass das Ergebnis sehr ähnlich bewertet wurde. Daher ist eine erneute detaillierte Betrachtung der Ergebnisse nicht notwendig.

In Frage 6 ging es um die Bewertung der verschiedenen Bedienungsmöglichkeiten, die die jeweiligen AR-Brillen anbieten. Diese unterscheiden sich dahingehend, dass die Vuzix Blade lediglich durch ein Berührungsfeld gesteuert werden kann, die Vuzix M400 darüber hinaus noch drei haptische Knöpfe besitzt und die HoloLens 2 im Rahmen von „AugControl“ eine Nutzereingabe ausschließlich durch zu berührende Hologramme ermöglicht. Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse des Fragebogens.

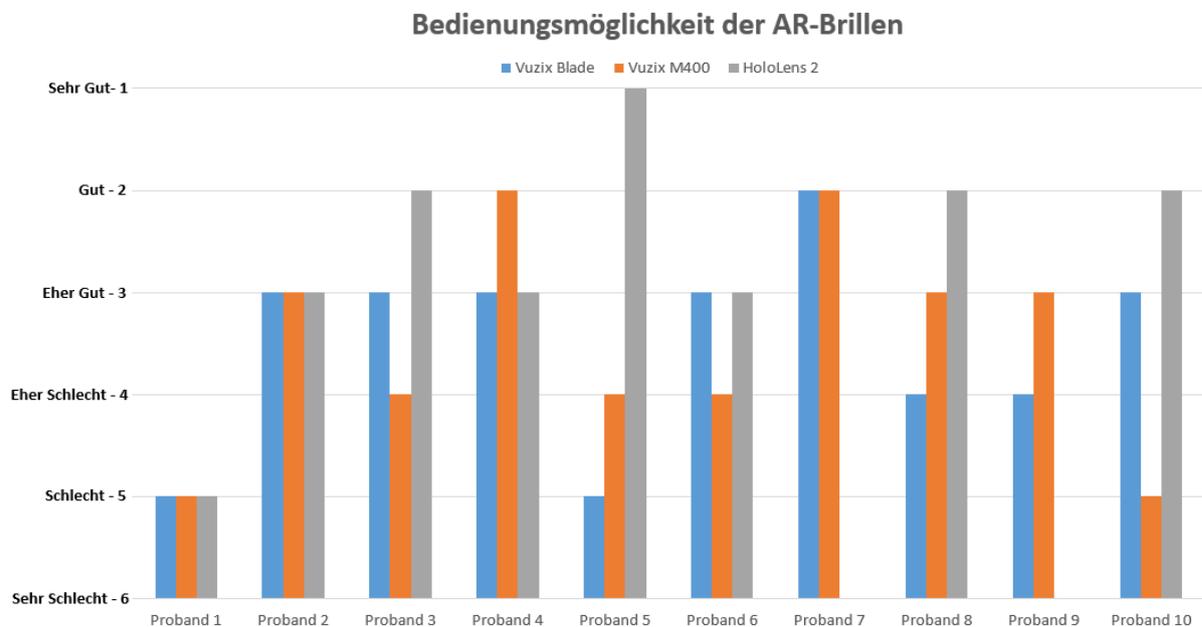


Abbildung 45: Bewertung der Bedienungsmöglichkeit der AR-Brille

(Quelle: Eigene)

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Bedienungsmöglichkeiten aller AR-Brillen auf einem sehr ähnlichen Niveau angenommen wurden. Die beste durchschnittliche Bewertung erhielt die HoloLens 2, die mit 33 Punkten die Bewertung „Eher Gut - 3“ erhält. Jedoch sind sowohl die Vuzix Blade, als auch die Vuzix M400 mit jeweils 35 Punkten auf einem nahezu identischen Niveau und erhalten ebenfalls die Bewertung „Eher Gut - 3“. Die HoloLens 2 erhielt als einzige AR-Brille die Bestnote „Sehr Gut - 1“ von Proband 5.

Die finale Frage zielte darauf ab, eine abschließende erneute Auswahl zwischen den drei AR-Brillen zu treffen und anschließend eine erneute Bewertung einzuholen, inwiefern die Einführung des Favoriten als sinnvolles Hilfsmittel in der Endkontrolle angesehen wird. Die

Frage war somit zweigeteilt. Begonnen wird mit der finalen Auswahl des Favoriten. Abbildung 46 zeigt die Verteilung der gewählten Favoriten in Prozent an.

Bevorzugtes Modell

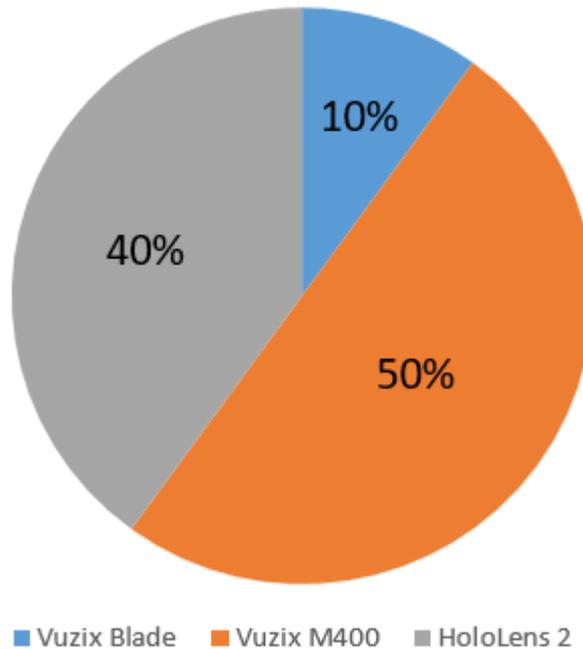


Abbildung 46: Abschließende Beurteilung des Favoritenmodells

(Quelle: Eigene)

Die Vuzix Blade wurde in der abschließenden Bewertung nur von einem Probanden als Favorit gewählt. Gründe dafür sind die Ergebnisse aus Frage 1 und 4, in welchen die Vuzix Blade mit Abstand am schlechtesten abschnitt. Sowohl der Grad der Unterstützung, als auch die hohe Sichtfeldeinschränkung macht die Vuzix Blade zum unbeliebtesten Modell. Deutlich bessere Ergebnisse liefern die HoloLens 2 mit 40% und die Vuzix M400 mit 50%. Die HoloLens 2 schnitt im Vergleich zur Vuzix M400 in allen Bewertungspunkten mindestens gleich gut oder sogar besser ab, wurde aber insgesamt nicht als Favorit gewählt.

Einführung des Favoriten

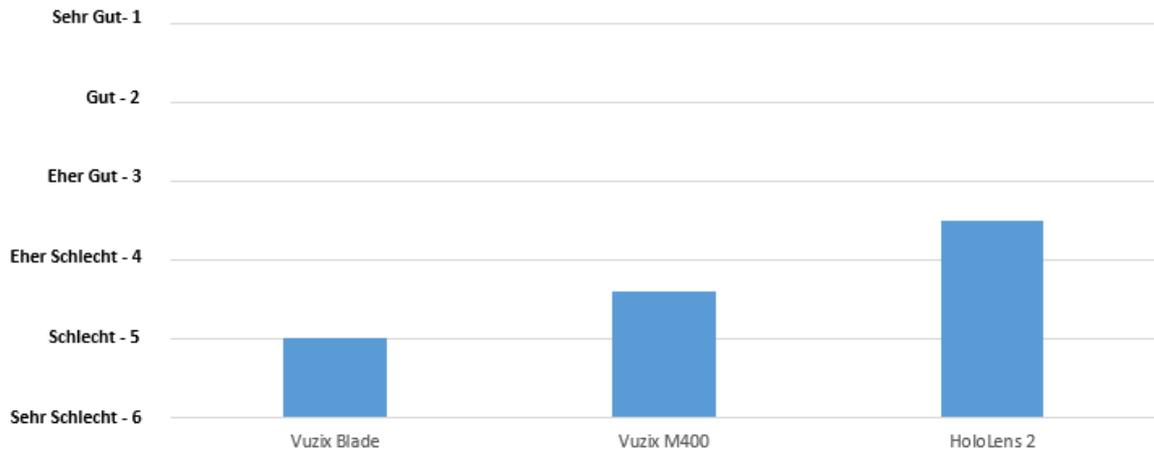


Abbildung 47: Abschließende Beurteilung über die Einführung des Favoriten

(Quelle: Eigene)

Zuletzt steht die Bewertung über die Sinnhaftigkeit des Favoriten aus, welche in Abbildung 47 veranschaulicht ist. Der eine Proband, der die Vuzix Blade als Favorit gewählt hat, gab der Vuzix Blade eine Bewertung von „Schlecht - 5“ bezogen auf den Grad der Sinnhaftigkeit. Die 40% der Probanden, die die HoloLens 2 als Favoriten gewählt haben, gaben ihr im Durchschnitt eine Bewertung von 3,5 Punkten, was einer Bewertung zwischen „Eher Gut - 3“ und „Eher Schlecht - 4“ entspricht. Der Favorit, die Vuzix M400, erhielt eine durchschnittliche Punktzahl von 4,6. Dadurch erhält die Vuzix M400 eine Bewertung zwischen „Eher Schlecht - 4“ und „Schlecht - 5“. Somit ist die HoloLens 2 die sinnvollste AR-Brille, jedoch ist der Favorit die Vuzix M400.

4.2 Auswertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse von Frage 1, bei der es um die Einschätzung über den Grad der Hilfe der jeweiligen AR-Brillen ging, fielen mit einer Bestnote von 3,5 für die HoloLens 2 und der schlechtesten Note von 4,9 für die Vuzix Blade eher schlecht aus. Auch die Vuzix M400, welche als Favorit der drei AR-Brillen gewählt wurde, schnitt lediglich mit 3,9 ab. Gründe für das eher schlechte Abschneiden der Vuzix Blade sind auf Basis der weiteren Fragen klar ersichtlich. Zum einen schränkt die Vuzix Blade aufgrund der Tatsache, dass der Bildschirm der AR-Brille permanent im rechten Glas der AR-Brille verbaut ist, die Sicht dauerhaft ein. Somit befindet sich der Bildschirm immer im Blickfeld und kann nicht umpositioniert werden, wie es bei der Vuzix M400 möglich ist. Auch die HoloLens 2 verfügt über einen hochklappbaren Mechanismus, der es ermöglicht, zu einer uneingeschränkten Sicht zu wechseln. Des

Weiteren wurde die Auflösung des Bildschirms bemängelt, wodurch die Anwendung im hellen Umfeld schwer sichtbar war. Vereinzelt wurden sogar leichter Schwindel als Nebeneffekt bemängelt. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Bedienungsfähigkeit. Zwar schnitten alle drei AR-Brillen auf einem ähnlichen Niveau ab, jedoch wurde grundsätzlich das Berührungsfeld bemängelt. Die Problematik besteht hauptsächlich darin, dass das Berührungsfeld an der rechten Schläfe positioniert ist. Dadurch ist das Berührungsfeld im Gegensatz zu einem Handheld Device wie einem Smartphone nicht sichtbar und erschwerte die Bedienung. Dies zeigt sich auch in der Auswertung, in welcher die HoloLens 2 geringfügig besser abschnitt als die AR-Brillen von Vuzix. Die Menüführung durch die sichtbaren und greifbaren Hologramme der HoloLens 2 schnitten somit am besten ab. Allerdings war die Erfahrung mit AR-Brillen für 70% der Probanden gänzlich neu, was ein Grund für das vergleichbar ähnliche Abschneiden aller AR-Brillen begründen könnte. Die Bedienung von Hologrammen ist ungewohnt und erfordert einen gewissen Grad an Übung, da die im Raum positionierten Hologramme, wie das Menü, nur dann betätigt werden, wenn die Hitbox der Hologramme mit der Hand des Anwenders kollidiert. Die Hitbox eines Objektes bezeichnet einen vordefinierten Bereich, in dem eine Kollision mit einem anderen Objekt als Kollision registriert wird. Nur wenn die Hitbox des Hologramms von der Hand des Probanden berührt wird, wird die Funktion des Knopfes ausgelöst. Die Vuzix Blade schnitt somit in den Bereichen Unterstützungsgrad und Sichtfeldeinschränkung deutlich schlechter ab als die Vuzix M400 und HoloLens 2. Lediglich der Tragekomfort der Vuzix Blade wurde als geringfügig besser bewertet als bei der Vuzix M400, stellte somit aber dennoch nur das Mittelfeld dar. Die Bedienungsmöglichkeit schnitt ebenfalls auf demselben Niveau wie die Vuzix M400 ab. Somit hat die Vuzix Blade gegenüber den anderen Geräten in keiner Kategorie einen Vorteil.

Die Vuzix M400 überzeugte die Probanden mit einem schwenkbaren Bildschirm, der sich nicht dauerhaft im Sichtfeld befindet. Der Komfort wurde überraschenderweise als schlechteste der drei AR-Brillen bewertet. Jedoch waren die Unterschiede mit durchschnittlich 27 Punkten für die HoloLens 2, 30 Punkten für die Vuzix Blade und 32 Punkten für die Vuzix M400 gering. Ebenfalls überraschend war, dass die Handhabung der Vuzix M400 trotz der hinzukommenden haptischen Knöpfe zu dem Berührungsfeld identisch mit der Vuzix Blade abschnitt, obwohl die Vuzix Blade lediglich das Berührungsfeld besaß. Begründet werden könnte das Ergebnis erneut mit der Tatsache, dass sowohl die Knöpfe als auch der Bildschirm wieder am rechten Brillenbügel positioniert war. Somit war auch bei der Vuzix M400 die Bedienung nicht sichtbar und musste blind durchgeführt werden. Dies wirkte sich hindernd auf eine schnelle und präzise Steuerung der Anwendung aus und könnte in der Endkontrolle, in welcher die Kontrolleure unter Zeitdruck stehen, ungeeignet sein. Dennoch erzielte die Vuzix M400 im Vergleich zur Vuzix Blade ein deutlich besseres Ergebnis bei Betrachtung der Unterstützung der täglichen Aufgaben. Auch die Sichtfeldeinschränkung wurde deutlich

besser als bei der Vuzix Blade bewertet. Grund dafür war die Positionierung des Bildschirms, welche von jedem Probanden individuell eingestellt werden konnte. Der Ansatz der Vuzix M400 den Bildschirm leicht unterhalb des rechten Auges zu positionieren, wurde positiv angenommen. Dadurch mussten die Probanden nur dann in den Bildschirm sehen, sofern Informationen notwendig waren. Abgesehen von diesem kurzen Moment war die Sicht des Kontrolleurs uneingeschränkt. In der finalen Befragung über den Favoriten wurde die Vuzix M400 mit 50% der Stimmen knapp als Favorit gewählt. Allerdings wurde die Einführung der Vuzix M400 dennoch als „Eher Schlecht - 4“ beziehungsweise „Schlecht - 5“ bewertet.

Die HoloLens 2 verkörperte als einzige der AR-Brillen ein anderes Bedienungskonzept durch sichtbare Hologramme. Dieses Bedienungskonzept wurde auch im Vergleich zu den AR-Brillen von Vuzix am besten bewertet. Die Bedienung war trotz nicht vorhandener Erfahrung mit dem Umgang intuitiv und leicht verständlich. Die Unterstützung der täglichen Aufgaben durch die HoloLens 2 wurde mit einer Bewertung von durchschnittlich 3,5 Punkten ebenfalls als Beste der 3 AR-Brillen bewertet. Gründe dafür könnten in einer Kombination positiver Bewertungen in Anbetracht der Bedienung, Komfort und Sichtfeldeinschränkung bestehen. Obwohl die HoloLens 2 mit Abstand die schwerste AR-Brille darstellte, erzielte der Komfort der HoloLens 2 mit 2,7 Punkten den besten Wert. Die gleichmäßige Verteilung des Gewichtes und gut durchdachte Befestigung am Kopf durch einen Stirnbandzug ermöglichte einen hohen Komfort trotz hohem Eigengewicht. Durch die Überlagerung von Hologrammen im Sichtfeld des Kontrolleurs war diese nicht durch ein statisches Bild eingeschränkt und ergänzte die Informationen im Sichtfeld des Probanden. Der hochklappbare Mechanismus der HoloLens 2 ermöglichte dem Probanden eine komplett uneingeschränkte natürliche Sicht auf den Prüfgegenstand, welche kein anderes Gerät in dem Umfang bieten konnte. Insgesamt wurde die HoloLens 2 von 40% der Probanden als Favorit gewählt und positioniert sich somit direkt hinter der Vuzix M400 mit besagten 50%. Eine Einführung des Favoriten bewerteten die 40% der Probanden, die die HoloLens 2 als Favorit gewählt hatten, mit 3,5 Punkten. Somit schnitt die HoloLens 2 im Vergleich zum Favoriten der Vuzix M400 deutlich besser ab. Obwohl sich die HoloLens 2 somit gegenüber der AR-Brillen von Vuzix behaupten kann, ist das Gesamtergebnis eher neutral. Die Bewertung mit 3,5 Punkten liegt genau zwischen den Noten „Eher Gut - 3“ und „Eher Schlecht - 4“ weshalb keine Tendenz vorliegt. Ein sinnvolles Hilfsmittel sollte aber eine eindeutig positive Tendenz nachweisen. Im Folgenden Abschnitt wird ein Fazit aus den Erkenntnissen des Versuchs gezogen.

4.3 Erkenntnisse

Die AR-Brille als mögliches Hilfsmittel in der Endkontrolle zeigt im Rahmen des Versuches eine klare Tendenz gegen die Einführung. Gründe dafür liegen sowohl an der Umgebung des Anwendungsfalls, als auch an der AR-Brille an sich und wirken im betrachteten Anwendungsfall zusammen. Ein wesentlicher Faktor des Anwendungsfalls ist der zeitliche Druck unter dem die Kontrolleure stehen. Ein Hilfsmittel muss somit intuitiv und schnell einsetzbar sein, welches die AR-Brille Stand heute aufgrund der Bedienungsmöglichkeiten nicht ermöglichen kann. Berührungsfelder und Knöpfe an der AR-Brille sind für den Nutzer nicht sichtbar und somit nicht schnell und intuitiv verwendbar. Im Gegensatz dazu sind Hologramme intuitiv und sichtbar aber nicht schnell genug navigierbar, da der Proband Schwierigkeiten bei der genauen Lokalisierung der Hologramme im Raum hatte. Auch wenn das Lokalisierungsproblem gelöst werden würde, besteht immer noch die Problematik, dass die Betätigung des Hologramms ein gewisses Maß an Übung und motorisches Geschick erfordert, welches bei Misserfolg weitere Zeit kosten würde. Beispielsweise können mehrere Knöpfe gleichzeitig ausgelöst werden, wenn die Hand des Anwenders mit Hitboxen zweier Hologramme gleichzeitig kollidiert. Die Nutzung eines externen Gerätes zur Steuerung der AR-Brillen wäre zwar möglich, wurde aber wegen des damit einhergehenden zusätzlichen Kabels aus Sicherheitsgründen von vornerein ausgeschlossen. Kabellose Bedienungshardware gibt es beispielsweise bei der nReal (siehe Kapitel 2.2.1), wodurch das Sicherheitsproblem umgangen werden könnte. Allerdings erfordert dies einen Fokuswechsel des Kontrolleurs vom Prüfgegenstand hin zum Steuerungselement, wodurch eine weitere Komponente erschaffen werden würde, auf die sich der Kontrolleur konzentrieren müsste. Eine Sprachsteuerung wäre eine weitere Bedienungsalternative, kann aber aufgrund der vorherrschenden Lautstärke im Werk nicht verwendet werden. Darüber hinaus könnten Sprachbefehle anderer Kontrolleure unbeabsichtigte Befehle auslösen. Somit ist Stand heute keine dem Anwendungsfall gerecht werdende Steuerungsmöglichkeit einer AR-Brille vorhanden, um ein schnelles und präzises Arbeiten zu erleichtern. Abgesehen von der Steuerung ist auch die Sichtbarkeit der Überlagerungen am vorliegenden Arbeitsplatz nicht ideal, da der Arbeitsplatz sehr hell beleuchtet ist und der Prüfgegenstand aus einem reflektierenden Material gefertigt ist. Darüber hinaus werden auch Taschenlampen eingesetzt um tiefe Bohrungen zu überprüfen, weshalb wechselnde Lichtverhältnisse und dadurch auch variierende Reflektionen verursacht werden. Diese Lichtverhältnisse und Reflektionen machen das Bild bei den mit Bildschirm arbeitenden Vuzix Blade und Vuzix M400 kontrastarm und schlecht sichtbar. Darüber hinaus ist die Größe der Bildschirme bei der Vuzix Blade und Vuzix M400 klein, um das Sichtfeld nicht unnötig einzuschränken. Dadurch waren Anweisungen und Bilder für einige Probanden zu klein und zu unscharf.

Um eine AR-Brille mit der aktuellen Technologie sinnvoll in einen Prozess mit ähnlichen Rahmenbedingungen einzubinden sind daher einige Faktoren des Anwendungsfalls zu berücksichtigen. Prozesse, die eine schnelle und präzise Abarbeitung erfordern, sind für AR-Brillen dann eher ungeeignet, wenn für die Anwendung der Applikation auf der AR-Brille eine Bedienungsmöglichkeit notwendig ist. Eine automatisierte Anzeige von Anweisungen und Texten auf Basis von Tracking ist schnell, präzise und ohne Bedienungsmöglichkeit möglich. Sobald aber eine Vielzahl von Informationen und Bildern vorhanden ist, zwischen denen ein aktiver Wechsel stattfinden muss, wird eine Interaktionsmöglichkeit benötigt, welche dann aber wiederum nicht schnell und präzise durchführbar ist. Somit muss für den sinnvollen Einsatz einer AR-Brille ein Anwendungsfall vorliegen, bei dem die notwendige Menge an Informationen automatisiert angezeigt werden kann und kein Wechsel zwischen Anweisungen und Bildern erforderlich ist, oder ein Wechsel so simpel gestaltet werden kann, dass beispielsweise die Betätigung von ein oder zwei Knöpfen ausreichend ist. Ebenfalls vorteilhaft für die sinnvolle Einführung einer AR-Brille ist zeitlicher Spielraum. Wenn ein Prozess zur Bearbeitung über genügend zeitlichen Spielraum verfügt, können komplexere Bedienungsmöglichkeiten im Laufe der Anwendungszeit erlernt und dessen Navigation verbessert werden.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine weiterführende und vertiefende Betrachtung der AR-Brille in Bezug auf den vorliegenden Anwendungsfall als nicht sinnvoll angesehen. Daher wird auf einen finalen Versuch verzichtet.

5. Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde überprüft, ob die Integration einer AR-Brille in einen bestehenden Prozess ein sinnvolles Hilfsmittel darstellt. AR wird bereits in verschiedenen Bereichen wie Medizin, Instandhaltung und Wartung und vielen weiteren Bereichen sinnvoll angewendet. Auch in der Automobilindustrie findet AR bereits Anwendung. Zu überprüfen war, ob im spezifischen Anwendungsfall, der Kontrolle der Kurbelgehäuse, ebenfalls eine Verbesserung beziehungsweise Optimierung durch sinnvolle Anwendung der AR-Brille möglich ist. Zunächst wurden dafür verschiedene AR-Visualisierungsmöglichkeiten vorgestellt, wie Handheld Devices, Head-up und Head-down Displays, AR-Projektoren und HMDs. Im Anschluss wurde dann die Funktionsweise von AR beschrieben, indem die zugrundeliegende Kerntechnologie, das Tracking, erläutert und auch auf verschiedene Formen von Tracking eingegangen wurde. Im Anschluss an die Funktionsweise wurden verschiedene Forschungs- und Anwendungsbereiche von AR erläutert. Dazu gehören Forschungs- und Anwendungsbereiche in der Medizin, in der Produktion, Instandhaltung, Wartung und Daimler interne Anwendungsgebiete.

Im Hauptteil der Arbeit wurde zunächst der Prüfprozess mithilfe von EPK modelliert und beschrieben. Im Anschluss wurde das mögliche Optimierungspotenzial durch Einsatz von AR in den Prüfprozessen analysiert. Ein wichtiger Bestandteil der Analyse bestand darin, eine Abwägung zwischen den verschiedenen Möglichkeiten zu treffen, mit der eine Darstellung von AR möglich ist. Das Ergebnis dieser Abwägung bestand in der Auswahl der AR-Brille als AR-Medium. Abschließend wurde ein neuer, potentiell optimierter Prozess modelliert. Daran anknüpfend wurde der eigene zu überprüfende Ansatz vorgestellt. Der Ansatz bestand aus initial drei Konzepten, die anhand der AR-Brille im Rahmen eines Versuchs umgesetzt werden sollten. Konzept A umfasste die Augmentierung von Schrift, Konzept B erweiterte Konzept A um zweidimensionale Bilder und Konzept C verfolgte einen Ansatz in welchem die Augmentierung von Schrift und Bild mithilfe von Hologrammen dreidimensional im Raum platziert werden. Im Versuch wurde jedoch auf Konzept A verzichtet, da die reine Anzeige von Text auf Basis einer Vorabumfrage als nicht hilfreich bewertet wurde. Im Anschluss an die Konzeptvorstellung wurden dann drei verschiedene AR-Brillen Modelle vorgestellt, die im Rahmen des Versuchs getestet werden sollten. Bei der Auswahl der AR-Brillen wurde darauf geachtet ein möglichst breites Spektrum an Eigenschaften abzudecken. Weshalb sowohl kompakte AR-Brillen als auch schwerere AR-Brillen ausgewählt wurden, die sich ebenfalls in der Leistung unterschieden. Dann wurden Erfolgskriterien für den Versuch definiert, auf dessen Basis im Anschluss an den Versuch der Erfolg oder Misserfolg bestimmt werden konnte. Um die AR-Brillen in einer möglichst realitätsnahen Umgebung testen zu können, wurden die zuvor beschriebenen Konzepte in der eigens erstellten Applikation „AugControl“ implementiert und im Anschluss im Werk Untertürkheim in Stuttgart getestet. Die drei AR-

Brillen wurden von jeweils 10 Probanden getestet, die alle ausgebildete Kontrolleure von Kurbelgehäusen waren. Aufgrund der COVID-19-Pandemie wurde der Versuch auf zwei Tage verteilt, an denen jeweils 5 Probanden teilnahmen. Die Ergebnisse des Versuchs zeigten eine klare Tendenz gegen die Einführung einer AR-Brille. Gründe für das Versagen der AR-Brille bestanden sowohl am Tragen und Navigieren der AR-Brille selbst, als auch an der Arbeitsumgebung und deren Umstände. Die Probleme der AR-Brille bestanden nicht im Komfort, sondern zum einen an der Sichtbarkeit der Informationen, die durch die helle Umgebung und das reflektierende Kurbelgehäuse gestört wurden. Zum anderen an einer schnellen und präzisen Menünavigation, die aufgrund der Zeitrestriktionen von bedeutender Wichtigkeit waren. Abschließend wurde auf Basis der Ergebnisse die Aussage getroffen, dass AR-Brillen in Anwendungsbereichen, in denen Zeit beziehungsweise Durchlaufzeiten von essentieller Bedeutung sind, oftmals ungeeignet sind. Grund dafür ist die gewöhnungsbedürftige Bedienung der AR-Brille. Der Umgang mit dreidimensionalen Hologrammen ist ungewohnt und bedarf eines gewissen Grades an Übung. Ein Berührungsfeld oder Knopf ist an der AR-Brille angebracht, wodurch diese im Gegensatz zu einem Smartphone nicht vor dem Anwender liegen, sondern am Kopf des Anwenders befestigt sind. Wenn die notwendige und abzubildende Information auf der AR-Brille groß genug ist um eine Menünavigation zu erfordern, ist somit eine schnelle und intuitive Menünavigation nicht möglich.

Auch wenn die AR-Brille im spezifischen Anwendungsfall zu keinem Mehrwert verhelfen konnte, wird diese bereits in vielen Bereichen wie auch in der Automobilindustrie wirksam eingesetzt. Daimlerintern wird die AR-Brille beispielsweise im Bereich Remote Service eingesetzt. Dadurch ist eine physische Anwesenheit von Mechanikern und Kontrolleuren an Versuchen, die in der ganzen Welt stattfinden können, nicht mehr zwangsläufig erforderlich. Möglicherweise wäre in der Endkontrolle der Kurbelgehäuse ein anderes AR-Medium zu prüfen. Neben der AR-Brille ermöglicht auch der AR-Projektor eine freihändige Kontrolle der Kurbelgehäuse und könnte durch beispielsweise Laserprojektoren auch in hellen Arbeitsumgebungen eine gut sichtbare Augmentierung ermöglichen. Jedoch wäre eine sinnvolle Bedienungsmöglichkeit zu finden, die den Kontrolleur bei der Arbeit nicht behindert und gleichzeitig schnell und intuitiv einzusetzen wäre. Ein befestigtes Eingabegerät am Rhönrad könnte eine solche Lösung darstellen. Da im Anwendungsfall aber bewusst auf ein externes Eingabegerät verzichtet wurde, blieb die Überprüfung aus. Möglicherweise wäre eine fest installierte externe Steuerung möglich und sinnvoll.

Die Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Applikation könnte in anderen Bereichen der Endkontrolle ebenfalls erneut evaluiert werden. Beispielsweise bei der Unterbodenkonstruktion der zu fertigenden Automobile, da je nach Arbeitsplatz andere Umgebungsvariablen und Restriktionen gelten. Dazu gehören Faktoren wie die Ausleuchtung

oder die räumliche Größe des Arbeitsplatzes. Wenn der Arbeitsplatz groß genug ist, könnten Leinwände für Projektoren aufgebaut werden, die eine Projektion mit Augmentierung ausgeben könnten. Dadurch wäre eine direkte Bestrahlung des Prüfgegenstandes nicht erforderlich, was bei reflektierenden Prüfgegenständen zu Sichtbarkeitsproblemen geführt hatte.

6. Literaturverzeichnis

- Anderson, B. (2021) Mercedes-Benz S-Class Has A Head-Up Display With Augmented Reality. Carscoops.com. <https://www.carscoops.com/2020/07/2021-mercedes-benz-s-class-has-a-head-up-display-with-augmented-reality/>, aufgerufen am 12.01.2021
- ARENA2036 e.V. (2021). Die ARENA2036 | ARENA2036. <https://arena2036.de/de/>, aufgerufen am 05.01.2021
- Azuma R., Bailiot Y., R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre (2001). Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE computer graphics and applications*, 21(6), pp. 34–47
- Barsom, E. Z., Graafland, M. & Schijven, M. P. (2016). Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surgical Endoscopy*, 30(10), pp. 4174–4183
- Bichlmeier, C., Wimmer, F., Heining, S. M. & Navab, N. (2007). Contextual Anatomic Mimesis Hybrid In-Situ Visualization Method for Improving Multi-Sensory Depth Perception in Medical Augmented Reality. In *Proceedings / the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality: November 13 - 16, 2007, Nara, Japan* pp. 129–138
- Billinghamst, M., Clark, A. & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 8(2-3), pp. 73–272
- Bimber, O. & Raskar, R. (2005). *Spatial augmented reality: Merging real and virtual worlds*. Books24x7.com
- Bottani, E. & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IISE Transactions*, 51(3), pp. 284–310
- Bur, J. W., McNeill, M.D.J., Charles, D. K., Morrow, P. J., Crosbie, J. H. & McDonough, S. M. (2010). Augmented Reality Games for Upper-Limb Stroke Rehabilitation. In *2010 Second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications* pp. 75–78
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I. & Leonard, J. J. (2016). Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), pp. 1309–1332
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E. & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51(1), pp. 341–377
- Evans, G., Miller, J., Iglesias Pena, M., MacAllister, A. & Winer, E. (2017). Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. In *J. N. Sanders-*

- Reed & J. J. Arthur (Hg.), SPIE Proceedings, Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017
- Farhidzadeh, A., Dehghan-Niri, E., Moustafa, A., Salamone, S. & Whittaker, A. (2013). Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Fractal Analysis of Residual Crack Patterns. *Experimental Mechanics*, 53(9), pp. 1607–1619
- Fernandez, G. L., Page, D. W., Coe, N. P., Lee, P. C., Patterson, L. A., Skylizard, L., St Louis, M., Amaral, M. H., Wait, R. B. & Seymour, N. E. (2012). Boot cAMP: educational outcomes after 4 successive years of preparatory simulation-based training at onset of internship. *Journal of Surgical Education*, 69(2), pp. 242–248
- Fiorentino, M., Uva, A. E., Gattullo, M., Debernardis, S. & Monno, G. (2014). Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. *Computers in Industry*, 65(2), pp. 270–278
- Genc, Y., Riedel, S., Souvannavong, F., Akinlar, C. & Navab, N. (2002). Marker-less tracking for AR: a learning-based approach. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality: September 30-October 1, 2002*, IEEE Computer Society, pp. 295–304
- Google AR & VR. (2020). ARCore. <https://arvr.google.com/arcore/>, aufgerufen am 21.01.2021
- Gurevich, P., Lanir, J. & Cohen, B. (2015). Design and Implementation of TeleAdvisor: a Projection-Based Augmented Reality System for Remote Collaboration. *Computer Supported Cooperative Work*, 24(6), pp. 527–562
- Jacki O'Neill, Stefania Castellani, Frédéric Roulland, Nicolas Hairon & Liwei Dai (2011). From Ethnographic Study to Mixed Reality: A Remote Collaborative Troubleshooting System. In *Proceedings of the 2011 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW 2011, Hangzhou, China, March 19-23, 2011*.
- Katiyar, Kalra, Garg. *Marker Based Augmented Reality*. *Advances in Computer Science and Information Technology*, 2015, pp. 441–445
- Kato, H. & Billinghurst, M. (1999). Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, San Francisco, California, 20.10-21.10.1999*, IEEE Comput. Soc., pp. 85–94
- Khan, W. A., Raouf, A. & Cheng, K. (2011). *Augmented Reality for Manufacturing*. In: *Khan Virtual Manufacturing*. Springer London.
- Koulieris, G. A., Akşit, K., Stengel, M., Mantiuk, R. K., Mania, K. & Richardt, C. (2019). Near-Eye Display and Tracking Technologies for Virtual and Augmented Reality. *Computer Graphics Forum*, 38(2), pp. 493–519

- Krevelen, D.W.F, van & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2), pp. 1–20
- Liu, Y.-C. & Wen, M.-H. (2004). Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(5), pp. 679–697
- Marchi, L. de, Ceruti, A., Marzani, A. & Liverani, A. (2013). Augmented Reality to Support On-Field Post-Impact Maintenance Operations on Thin Structures. *Journal of Sensors*, 2013, pp. 1–10
- Mardanbegi, D. & Hansen, D. W. (2012). Parallax error in the monocular head-mounted eye trackers. In A. K. Dey, H.-H. Chu & G. Hayes (Hg.), *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing* p. 689. ACM Digital Library
- Masoni, R., Ferrise, F., Bordegoni, M., Gattullo, M., Uva, A. E., Fiorentino, M., Carrabba, E. & Di Donato, M. (2017). Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 1296–1302
- Mercedes-Benz EQC: MBUX Augmented Reality für Navigation. (2021). <https://www.mercedes-benz.de/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqc/comfort.pi.html/mercedes-benz-cars/models/eqc/comfort/comfort-gallery/augmented-video>, aufgerufen am 13.01.2021
- Microsoft. (2020). Azure Kinect DK – Entwickeln von KI-Modellen | Microsoft Azure. <https://azure.microsoft.com/de-de/services/kinect-dk/>, aufgerufen am 26.01.2021
- Microsoft. (2021a). HoloLens 2—Overview, Features, and Specs | Microsoft HoloLens. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>, aufgerufen am 01.02.2021
- Microsoft. (2021b). Welcome to MRTK | Mixed Reality Toolkit Documentation. <https://microsoft.github.io/MixedRealityToolkit-Unity/Documentation/WelcomeToMRTK.html>, aufgerufen am 05.02.2021
- Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. & Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In H. Das (Hg.), *SPIE Proceedings, Telem manipulator and Telepresence Technologies*, pp. 282–292 SPIE
- Nreal. (2020). Nreal - Building Mixed Reality for Everyone. <https://www.nreal.ai/>, aufgerufen am 01.02.2021
- Nüttgens, M. & Rump, F. J. (2002). Syntax und Semantik Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK), pp. 1617-5468
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R. & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, pp. 215–228

- pfeifer marketing, Teramostraße 6 D-87700 Memmingen Email: info@pfeifer-marketing.de. (2021). ematec. https://www.ematec.com/de/leistungen/maerkte-zielgruppen/automobilindustrie/?pro_id=351, aufgerufen am 20.02.2021
- Polvi, J., Taketomi, T., Yamamoto, G., Dey, A., Sandor, C. & Kato, H. (2016). SlidAR: A 3D positioning method for SLAM-based handheld augmented reality. *Computers & Graphics*, 55, pp. 33–43
- Qualcomm. (2020). Qualcomm Snapdragon 850 Mobile Compute Platform | 4G LTE Laptop Processor from Qualcomm. <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-850-mobile-compute-platform>, aufgerufen am 02.02.2021
- Sanna, A., Manuri, F., Lamberti, F., Paravati, G. & Pezzolla, P. (2015). Using handheld devices to support augmented reality-based maintenance and assembly tasks. In *Consumer Electronics (ICCE), 2015 IEEE International Conference on IEEE*, pp. 178–179
- Scooley. (2020). HoloLens 2-Hardware. <https://docs.microsoft.com/de-de/hololens/hololens2-hardware>, aufgerufen am 02.02.2021
- Sekhvat, Y. A. & Namani, M. S. (2018). Projection-Based AR: Effective Visual Feedback in Gait Rehabilitation. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48(6), pp. 626–636
- Tagesschau (2020). Diesellaffäre: VW drohen weitere Bußgelder in den USA. [tagesschau.de. https://www.tagesschau.de/wirtschaft/vw-berufungsgericht-101.html](https://www.tagesschau.de/wirtschaft/vw-berufungsgericht-101.html), aufgerufen am 01.01.2021
- Technologies, U. (2021). Sie fragen sich was Unity ist? Entdecken Sie, wer wir sind, wo wir angefangen haben und wohin wir uns entwickeln | Unity. <https://unity.com/de/our-company#>, aufgerufen am 15.02.2021
- Vuforia. (2021). Vuforia Developer Portal |. <https://developer.vuforia.com/>, aufgerufen am 15.02.2021
- Vuzix. (2020). Compare Vuzix Smart Glasses. <https://www.vuzix.com/products/compare-vuzix-smart-glasses>, aufgerufen am 13.01.2021
- Vuzix. (2021). Vuzix Blade® Upgraded Version. <https://www.vuzix.com/products/blade-smart-glasses-upgraded>, aufgerufen am 13.01.2021
- Wagner, D. & Schmalstieg, D. (2003). First steps towards handheld augmented reality. In *Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003. Proceedings IEEE / Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated*, pp. 127–135
- Wang, Y., Zhang, S., Wan, B., He, W. & Bai, X. (2018). Point cloud and visual feature-based tracking method for an augmented reality-aided mechanical assembly system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9-12), pp. 2341–2352.

Welch, G. & Foxlin, E. (2002). Motion tracking: no silver bullet, but a respectable arsenal. *IEEE computer graphics and applications*, 22(6), pp. 24–38

Zeng, W., Woodhouse, J. & Brunt, L. M. (2010). Do preclinical background and clerkship experiences impact skills performance in an accelerated internship preparation course for senior medical students? *Surgery*, 148(4), pp. 768-76; discussion 776-7

7. Anhang

7.1 Interview Transkript mit Daniel Pohlandt

Daniel Pohlandt: Mein Name ist Daniel Pohlandt und ich bin seit August 2017 in der Daimler AG im Virtual Reality Center der ARENA2036. Einer meiner Hauptaufgaben im VRC ist die Koordinierung der Applikationsentwicklung von VR/AR Lösungen, die den Fahrzeugentwicklungsprozess auf unterschiedliche Art und Weisen unterstützen. Aufgrund der technischen Entwicklung der letzten 10 Jahre ist das Thema AR/MR relevanter denn je, weshalb die Daimler AG das VRC in 2017 eröffnet hat.

Niko Klaiber: Was versteht die Daimler AG unter AR und MR?

Daniel Pohlandt: Unter AR verstehen wir bei Daimler prinzipiell die Überlagerung virtueller Inhalte über die echte Welt und ist somit ein Überbegriff von MR. Das geschieht meistens mit see-through HMD, mobilen Smartdevices oder auch mit komplexen Kamerasystemen.

Nur wenn eine gewisse Kontextabhängigkeit entsteht, wie zum Beispiel, wenn CAD Modelle virtuell lagerichtig mit der realen Welt überlagert werden oder gewisse Okklusionen/Verdeckung zwischen der echten und der realen Welt entstehen, sprechen wir von MR. Somit ist MR für uns eine Spezialisierung von AR. Außerdem wichtig ist, dass sowohl in AR als auch in MR immer die reale Welt sichtbar bleibt, also nie vollständig verdeckt wird, weil wir sonst eher in den Bereich Augmented Virtuality oder je nach Grad der Simulation in die Virtual Reality fallen. Weiteres Merkmal von MR und AR ist, dass immer virtuelle Daten im Sichtfeld sind. Diese können entweder kontextabhängig sein, was bei uns als MR bezeichnet werden würde oder kontextunabhängig sein, wo wir wieder bei AR wären.

Niko Klaiber: In der wissenschaftlichen Arbeit von Milgram et al. (1995) wird MR, im Gegensatz zu Ihrem Verständnis hier bei Daimler, als Oberkategorie von AR und AV beschrieben. Woher kommt die gegensätzliche Ansicht bei der Daimler AG?

Daniel Pohlandt: Unser Verständnis von AR und MR hier bei Daimler ist aus der Industrie geprägt und entspricht unter anderem dem Verständnis von Microsoft und Magic Leap.

Niko Klaiber: Welche AR-Brillen werden im VRC beziehungsweise in der Daimler AG bereits angewendet?

Daniel Pohlandt: Im Bereich AR setzen wir hauptsächlich auf die Microsoft HoloLens. Wir haben viele Use Cases mit der HoloLens der ersten Generation. Mittlerweile nutzen wir in vielen Bereichen aber auch schon die HoloLens 2. Das Gerät ist meiner Meinung nach momentan der state-of-the-art, was AR Technologie betrifft. Natürlich haben wir auch Anwendungsfälle wo keine derartige „Power Brille“ benötigt wird, hier nutzen wir die Vuzix M400. Das Gerät ist sehr schlicht und erfüllt im Bereich AR Remote Service unsere Anforderungen. Neben diesen beiden Brillen haben wir natürlich auch zahlreiche andere getestet, im Einsatz sind diese aber nicht.

Niko Klaiber: Vielen Dank für die Zeit und das Gespräch. Ich wünsche Ihnen noch einen angenehmen Tag.

7.2 Interview Transkript mit Dirk Heinsohn

Dirk Heinsohn: Guten Tag, mein Name ist Dirk Heinsohn und ich bin Vertriebsleiter bei Extend3D. Meine Hauptaufgaben bestehen aus dem Verkauf von unseren eigenen Video- und Laserprojektoren, welche als Werkerassistenzsysteme mit dem Thema Industrie 4.0 im Bereich Prototypenbau, Schiff- und Flugzeugbau, Transportation, Inlinefertigung, QS, Sonderfahrzeuge und allgemeiner Maschinenbau eingesetzt werden.

Niko Klaiber: Wie funktioniert ein AR-Projektor? Gibt es verschiedene Arten/ Typen von Projektoren?

Dirk Heinsohn: AR-Projektoren funktionieren grundsätzlich wie normale Projektoren, die man aus der Schule oder dem Heimkino kennt. Sie projizieren eine Grafik, Konturen oder Text mithilfe einer Lichtquelle auf eine Oberfläche. Der Unterschied besteht darin, dass der AR-Projektor mit weiteren Kamerasensoren ausgestattet ist, die ein Tracking über Referenztargets ähnlich wie bei den AR-Brillen ermöglichen. Je nach Anwendungsfall können natürlich verschiedene Trackingvarianten eingesetzt werden. Alternativ kann auch über die Geometrie des Bauteils oder statische Referenzpunkte ausgerichtet werden.

In der Industrie werden hauptsächlich Licht- und Laserprojektoren eingesetzt.

Niko Klaiber: Was sind grundsätzlich wichtige Voraussetzungen für den Einsatz von AR-Projektoren?

Dirk Heinsohn: Die Voraussetzungen hängen natürlich von der Art des Projektors und dem gewünschten Ziel ab. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass Lichtverhältnisse eine wichtige Rolle spielen, um ausreichend Kontrast zu ermöglichen. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Oberflächenbeschaffenheit des anzustrahlenden Objektes. Spiegelnde und glänzende Oberflächen stellen eine Herausforderung an das Tracking des AR-Projektors dar. Auch die Projektion ist auf solchen Oberflächen schwerer zu sehen. Schwarz glänzend verschluckt viel eintreffendes Licht, spiegelnd glänzend reflektiert am meisten. Weiterhin vorteilhaft ist eine statische Umgebung, die aber in der von dir beschriebenen Endkontrolle der Kurbelgehäuse gegeben zu sein scheint. Dadurch muss der Projektor nicht umgestellt werden, was das Tracking der Kurbelgehäuse erleichtern sollte. Wird das Kurbelgehäuse jedoch rotiert, benötigt es seitens der Software einiges um dies mathematisch umrechnen zu können. Bei einer statischen Lösung ist es vorteilhaft nur aus einer Richtung her zu projizieren.

Niko Klaiber: Was sind Vor- und Nachteile eines Lichtprojektors beziehungsweise Laserprojektors?

Dirk Heinsohn: Grundsätzlicher Vorteil eines Projektors ist natürlich die Tatsache, dass dieser nicht wie eine AR-Brille am Kopf getragen werden muss. Die Sicht ist somit nicht durch einen Bildschirm gestört und möglichen Nebeneffekten wie Schwindel und Übelkeit kann somit vorgebeugt werden.

Ein Lichtprojektor ist in der Lage die für deinen Anwendungsfall gewünschten Hinweise, wie Arbeitsanweisungen und Grafiken abzubilden. Allerdings benötigen sie dafür ausreichend Kontrast um die Projektion gut und sichtbar darzustellen. In sehr hell ausgeleuchteten Arbeitsumgebungen sind Lichtprojektoren daher generell eher ungeeignet, jedoch gibt es am Markt mittlerweile leistungsstarke Projektoren, die dieses Problem nicht haben. Der Beamer sollte mindestens die 10-fache Helligkeit, sprich Lumen aufweisen, als die Umgebungshelligkeit. Je heller ein Raum, desto stärker muss der Lichtdurchsatz pro Zeit, gemessen in Lumen, sein und desto höher sind die Kosten des Projektors. Vergleichsweise sind die Lichtprojektoren trotzdem günstiger als Laserprojektoren.

Ein Projektor, der häufig als Einstiegslösung in der Industrie eingesetzt wird, ist der Acer PL6510. Dieser kostet ungefähr 1900€. Dieser muss aber noch auf den Abstand zum Bauteil kalibriert werden. Alle Systeme werden mit unserer eigenen Software Werklicht3d Editor betrieben. Schlussendlich sind mit ungefähr 13000 - 15000€ für eine Basiskonfiguration zu rechnen, welche aber wie bereits angesprochen in sehr hellen Umgebungen über nicht ausreichend Lichtdurchsatz verfügen. Für den Einsatz in normalem Werkstattbetrieb sind diese jedoch völlig ausreichend.

Der Vorteil eines Laserprojektors besteht darin, dass der Kontrast beziehungsweise die Lichtverhältnisse am Arbeitsplatz nicht so bedeutend sind wie im vorhergehenden Fall, da der Laser auch in hellen Umgebungen gut sichtbar ist. Allerdings sind Laserprojektoren nicht darauf ausgelegt, Flächen auszuleuchten, wie es in deinem Anwendungsfall notwendig wäre. Die Technologie ist darauf ausgelegt, präzise und detaillierte Konturen anzuzeigen. Auch die Anzahl der gleichzeitig anzuzeigenden Elemente ist aufgrund der Mechanik begrenzt.

Kostentechnisch sind Laserprojektoren mit integrierten Kamerasystemen wesentlich teurer als Lichtprojektoren. Statische Lösungen sind vom Preis her jedoch ähnlich.

Niko Klaiber: Vielen Dank für Ihre Zeit und Einschätzungen. Ich wünsche Ihnen noch einen schönen Tag.

7.3 Fragebögen des Versuchs

Bitte tragen Sie das Datum nach folgendem Schema ein: Tag/Monat/Jahr			26.01.2021
2. Buchstabe Ihres Geburtsortes	3. Buchstabe Ihres Geburtsmonats	2. Buchstabe des Namens Ihrer Mutter	4. Ziffer Ihres Geburtsjahres
Beispiel: Stuttgart -> T	Beispiel: Januar -> N	Beispiel: Monika -> O	Beispiel: 1994 -> 4
<input type="checkbox"/> Männlich <input type="checkbox"/> Weiblich <input type="checkbox"/> Divers	Geben Sie bitte Ihr Alter an:		
	<input type="checkbox"/> Unter 18	<input type="checkbox"/> Zwischen 18 und 30	<input type="checkbox"/> Zwischen 31 und 43
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Zwischen 44 und 56
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Älter als 56
Welche Brille haben Sie getestet?			
<input type="checkbox"/> Holo Lens 2	<input type="checkbox"/> Vuzix Blade	<input type="checkbox"/> Vuzix M400	
Schätzen Sie ein, inwiefern die Augmented Reality (AR) Brille Sie bei Ihren täglichen Aufgaben unterstützen würde:			
<input type="checkbox"/> Sehr Gut	<input type="checkbox"/> Gut	<input type="checkbox"/> Eher Gut	<input type="checkbox"/> Eher Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sehr Schlecht
Bewerten Sie bitte inwiefern die Einführung einer AR-Brille aus Ihrer Sicht sinnvoll wäre. (Von 1 "Sehr sinnvoll" bis 6 "Gar nicht sinnvoll")			
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 6
Bewerten Sie bitte den Komfort der Brille:			
<input type="checkbox"/> Sehr Gut	<input type="checkbox"/> Gut	<input type="checkbox"/> Eher Gut	<input type="checkbox"/> Eher Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sehr Schlecht
Bewerten Sie bitte inwiefern die AR Brille Ihr Sichtfeld eingeschränkt hat. (Von 1 "Gar nicht einschränkend" bis 6 "Sehr einschränkend")			
<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 5
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 6
Bewerten Sie bitte das Gewicht der Brille:			
<input type="checkbox"/> Sehr Gut	<input type="checkbox"/> Gut	<input type="checkbox"/> Eher Gut	<input type="checkbox"/> Eher Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sehr Schlecht
Wie gut oder schlecht konnten Sie mit der Bedienung der Brille umgehen?			
<input type="checkbox"/> Sehr Gut	<input type="checkbox"/> Gut	<input type="checkbox"/> Eher Gut	<input type="checkbox"/> Eher Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Schlecht
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sehr Schlecht

Bitte geben Sie an, ob Sie Links- oder Rechtshänder sind.

Linkshänder Rechtshänder

Geben Sie bitte an, ob Sie bereits Erfahrung mit Augmented Reality (AR) gemacht haben.

Ja Nein

Falls die vorherige Frage mit "Ja" beantwortet wurde, welche Art von Gerät haben Sie benutzt.

AR-Brille AR-Projektor Smartphone Tablet

Falls die vorherige Frage mit "Ja" beantwortet wurde, wofür haben Sie AR verwendet.

Bitte geben Sie an, ob Sie eine Sehstörung oder sonstige Seheinschränkung haben, die Sie bei der Anwendung der AR-Brille eingeschränkt hat.

Falls Sie weitere Ideen, Anregungen, Verbesserungsvorschläge oder ähnliches haben, tragen Sie es bitte folgend ein.

Bitte nur beantworten, nachdem Sie alle 3 AR-Brillen getestet haben.
Welches Modell finden Sie für die Endkontrolle am hilfreichsten und aus welchem Grund.

Holo Lens 2 Vuzix Blade Vuzix M400

Bewerten Sie wie sinnvoll die Einführung Ihres Favoriten in der Endkontrolle für Sie wäre:

Sehr Gut Gut Eher Gut Eher Schlecht Schlecht Sehr Schlecht