

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme

Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
D–70569 Stuttgart

Diplomarbeit Nr. 3704

Context Cubes – A Context-Aware Projected Augmented Reality Helmet

Michael Nistor

Studiengang: Softwaretechnik

Prüfer/in: Prof. Dr. Albrecht Schmidt

Betreuer/in: Dipl.-Inf. Markus Funk
Dipl.-Inf. Sven Mayer

Beginn am: 8. Dezember 2014

Beendet am: 9. Juni 2015

CR-Nummer: H.5.2

Kurzfassung

Die Kommissionierung ist einer der größten Kostenpunkte in modernen Lagerhäusern. Obwohl die Technologie heutzutage bereits vorhanden ist, wird die Kommissionierung in den meisten Lagerhäusern überwiegend ohne den Einsatz von technischen Hilfsmitteln ausgeübt. Die Gründe sind vielfältig. Sie beginnen bei den Kosten und enden bei bisher gemachten eigenen Erfahrungen. Als Beispiel ist die Pick-by-Paper Methode anzuführen, bei der die Kommissionierung über eine Packliste ausgeführt wird. Die Kosten hierfür sind äußerst gering, die Methode ist flexibel und skalierbar. Es sind zwar Defizite in der Fehlerrate und benötigten Zeit vorhanden, dies wird jedoch im Hinblick bezüglich der Vorteile als weniger gravierend eingestuft. Aus diesem Grund ist es lohnenswert, Forschungszeit in dieses Themengebiet zu investieren. In dieser Diplomarbeit soll gezeigt werden, wie heutige Technologien zu Verbesserungen beim Ablauf der Kommissionierung führen können. Der Begriff Augmented Reality gewinnt in immer mehr unterschiedlichen Gebieten Einzug, inzwischen auch bei der Kommissionierung. Die bereits existierende Pick-by-Vision Kommissioniermethode benutzt im Standardfall ein Head-Mounted-Display. Es existieren hier jedoch einige Defizite. Aus diesem Grund wurde ein Projektorhelm konstruiert, welcher für die Pick-by-Vision Methode einen alternativen Ansatz aufzeigen soll. Er hat die Aufgabe den Nutzer zu den Entnahme- und Ablageorten zu führen. Für den Projektorhelm wurde ein Prototyp entwickelt. Die Interaktion mit dem System erfolgt über ein Floor-Display. Um die optimale Anzahl an Interaktionszonen zu ermitteln, wurde eine Benutzerstudie durchgeführt. In einer zweiten Benutzerstudie wurde der Projektorhelm mit der Pick-by-Paper Methode verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen des Projektorhelms an den Benutzer deutlich geringer sind.

Abstract

Order picking tasks are one of the largest costs in modern warehouses. Although the technology already exists, order picking tasks in most warehouses are done mainly without the usage of technical aid. There are various reasons. It starts with the higher costs and ends with own achieved experiences. A good example is the Pick-by-Paper method. Here, the order picking task is executed with a simple piece of paper. The costs are extremely low, the method is flexible and scalable. But the error rate is quite high. In comparision to the benefits, the disadvantages are meant to be lower. For this reason, it is useful to invest time in research of this topic. This thesis will show how today's technologies can lead to improvements for order picking tasks. The term Augmented Reality got more and more important in a lot of different fields, even for order picking. The existing Pick-by-Vision method, in the default case, is using a head-mounted display, but there are several disadvantages. For this reason, a projector helmet was constructed, which has the intention to show an alternative approach for the Pick-by-Vision method. The prototype guides the user to the removal or storage location. For the communication with the system a Floor-Display is used. A user study was conducted to reveal the optimal number of interaction areas. A second user study was also conducted in which the developed system was compared with the Pick-by-Paper method. The results show that the mental requirements for the projector helmet are much lower for the user.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
1.1. Problemstellung	10
1.2. Motivation	10
1.3. Gliederung	11
2. Forschungsstand	13
2.1. Augmented Reality	13
2.2. Projizierte Benutzeroberflächen	15
2.3. Fußeingabe	17
2.4. Kommissionierung	18
2.5. Zusammenfassung und Diskussion	22
3. Floor-Display-Prototyp	25
3.1. Aufbau	25
3.2. Funktionalität	28
3.3. Visualisierung	30
3.4. Erkennung von Fußinteraktionen	30
4. Evaluierung des Floor-Display-Prototyps	35
4.1. Design	35
4.2. Teilnehmer	37
4.3. Ablauf	37
4.4. Resultate	38
4.5. Diskussion	41
4.6. Einschränkungen	42
5. Kommissionierungs-Prototyp	43
5.1. Aufbau	43
5.2. Funktionalität	43
5.3. Visualisierung	47
5.4. Netzwerk	48
5.5. Algorithmus	48
6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps	51
6.1. Design	51
6.2. Teilnehmer	53
6.3. Aufbau	53
6.4. Ablauf	54

6.5. Resultate	57
6.6. Diskussion	60
6.7. Einschränkungen	61
7. Zusammenfassung und Ausblick	63
A. Anhang	65
Literaturverzeichnis	71

Abbildungsverzeichnis

2.1. Reality-Virtuality (RV) Continuum nach Milgram. Quelle: [MTUK94]	15
3.1. Aufbau eines Industrieschutzhelms. Quelle: [Ber06]	25
3.2. Darstellung des konstruierten Projektorhelms.	26
3.3. Vergleich zwischen dem Default Mode und dem Near Mode der Kinect for Windows.	27
3.4. Verfärbung der Interaktionszone bei erkannter Fuß-Interaktion.	30
3.5. Die von der Kinect erfasste Fläche mit der Projektionsfläche im Inneren.	31
3.6. Bounding-Box um einen Schuh bei fünf Interaktionszonen.	32
3.7. Probanden bei der Benutzung des Floor-Displays.	34
4.1. Erkannte Fuß-Interaktion während der Benutzerstudie.	38
4.2. Paarweiser Vergleich bzgl. der Zeit mit Y = 1 und Y = 2.	39
4.3. Paarweiser Vergleich bzgl. des TLX-Wertes für die Ergebnisse mit Y = 1 und Y = 2.	40
4.4. Paarweiser Vergleich bzgl. der Fehlerzahl für die Ergebnisse mit Y = 1 und Y = 2.	41
5.1. Ausschnitt des Projektorhelms mit dem Fokus auf den Rigid Body.	44
5.2. Verwendete Richtungs-, Rotations- und Höhen-/Tiefen-Pfeile.	47
5.3. Ein Benutzer beim Interagieren mit dem System.	48
6.1. Ablageorte der Benutzerstudie.	53
6.2. Ein Proband bei der Erledigung eines Auftrags mittels einer Packliste.	55
6.3. Eine erkannte Interaktion eines Probanden innerhalb der Start-Zone.	56
6.4. Durchschnittliche Zeiten, für eine Entnahme aus dem Entnahmestandort und der durchschnittlichen Zeit für die Erledigung einer Aufgabe.	57
6.5. Durchschnittliche Zeiten für eine Entnahme aus dem Entnahmestandort und für die Erledigung einer Aufgabe.	58
6.6. Der durchschnittliche NASA-TLX Score für die Erledigung einer Aufgabe, inklusive des Standardfehlers.	59
6.7. Die durchschnittliche Gesamtfehleranzahl für die Erledigung einer Aufgabe, inklusive des Standardfehlers.	59
A.1. Die in der Benutzerstudie verwendete Einverständniserklärung in deutscher Sprache.	66
A.2. Einer der vier Abläufe für die Benutzerstudie inklusive Einstiegsfragen.	67
A.3. Die zwei verwendeten unterschiedlichen Packzettel für Pick-by-Paper.	68
A.4. Der NASA-TLX in englischer Sprache.	69
A.5. Abschließende Fragen für die Probanden der Benutzerstudie.	70

Tabellenverzeichnis

4.1. Balanced Latin Square für die Floor-Display-Benutzerstudie.	35
6.1. Counter-balanced Variablen für die Benutzerstudie.	51

1. Einleitung

Schon länger herrscht ein Kampf zwischen dem Einzel- und dem Onlinehandel. Online-Riesen wie Amazon versuchen ihr Sortiment stetig weiter auszubauen. 2014 hatte Amazon Deutschland bereits über 150 Millionen verschiedener Produkte im Sortiment, Amazon USA mit etwa 280 Millionen fast das Doppelte.¹ Auch andere Onlinenhändler versuchen mit ihrem großen und stetig wachsenden Sortiment zu werben. Texte in der Art wie: "Mehr als eine Million verschiedene Artikel, über 1000 neue Artikel täglich."² sind immer öfters zu finden. Aber auch mit schnellen Lieferzeiten versuchen Firmen die Kunden für sich zu gewinnen. Manche versuchen den Kunden durch die Angabe des Besitzes von vielen Warenlagern zu überzeugen, andere machen dies auf andere Weise, indem sie beispielsweise 24-Stunden-Lieferungen anbieten. Eine aktuelle Studie [com15] hat folgende Reihenfolge für eine möglichst hohe Kundenzufriedenheit aufgezeigt.

1. Produktbeschreibung
2. Shop-Bewertungen
3. Produktvielfalt
4. Lieferzeit

Während die Produktbeschreibung in rein textueller Form geschehen kann und unabhängig von den anderen drei Faktoren zu betrachten ist, sind die Shop-Bewertungen auch abhängig von der Produktvielfalt und der Lieferzeit. Doch hier beginnt bereits die Problematik. Je größer die Produktvielfalt ist, desto länger dauert es, Aufträge mitsamt ihren einzelnen bestellten Artikeln für den Versand zusammen zu stellen. Diesen Vorgang nennt man auch Kommissionierung. Beide Punkte sind jedoch dem Kunden sehr wichtig. Also muss ein möglichst effektives System existieren, dass die Unterstützung bei der Kommissionierung so gut ermöglicht, dass auch große Aufträge schnell bearbeitet werden können. Es ist neben der Geschwindigkeit, auch die Genauigkeit von mindestens genau so großer Bedeutung, da Falschlieferungen sehr schnell zu schlechten Kundenbewertungen führen können.

¹<http://marketplace-analytics.de/sortimentsgroesse-von-amazon-in-alle-laendern>

²<http://www.miniinthethebox.com/de/>

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Nach Bartholdi et al. [BH14] macht die Kommissionierung über 55 Prozent der Gesamtkosten in modernen Lagerhäusern aus und interessanterweise fallen etwa 65 Prozent dieser Kosten auf zu laufende Wege und Suchen von Posten an.

Obwohl zu erkennen ist, dass hier eine Problemsituation vorhanden ist, wird der Einsatz von moderner Technik in vielen Fällen noch vermieden und die Kommissionierung erfolgt oft über Packlisten, auch bekannt als Pick-by-Paper Methode [GRX⁺14]. Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe. Mit moderner Technik sind im Regelfall auch hohe Kosten verbunden. Neben den eigentlichen Anschaffungskosten, fallen auch Betriebs- und Wartungskosten an. Aber auch weitere Defizite für die "modernen" Kommissioniermethoden sind existent. Eine bekannte Kommissioniermethode ist beispielsweise Pick-by-Light, bei der Regalfächer mit Lichtern versehen werden, um darauf hinzuweisen, von wo Gegenstände entnommen werden müssen [Bau13]. Das Problem hierbei sind jedoch die sehr hohen Kosten für Skalierbarkeit.

Pick-by-Paper hingegen ist äußerst kostengünstig, jedoch vor allem bei größeren Aufträgen fehleranfällig [GRX⁺14]. Zur Zeit gewinnt auch die Pick-by-Vision Methode immer mehr an Bedeutung und Forschungszeit wird hier investiert. Bei dieser Methode wird dem Nutzer durch grafisches Feedback angezeigt, von wo er eine bestimmte Anzahl an Artikeln zu entnehmen hat. Hierfür wird im Regelfall ein Head-Mounted-Display benutzt, das dem Nutzer unmittelbar vor den Augen visuell Informationen darstellt. Obwohl mit dieser Methode die Schnelligkeit zunimmt, kann die Genauigkeit sehr darunter leiden [Pic14]. Der Genauigkeitsverlust tritt beispielsweise ein, wenn die Datenbrille nicht genau sitzt. Ein weiteres schwerwiegendes Manko ist, dass bei manchen Menschen, beim Tragen der Datenbrillen, starke Kopfschmerzen auftreten könnten [SRG⁺09]. Pick-by-Vision ist jedoch nicht auf die Nutzung eines Head-Mounted-Displays festgelegt. Vielmehr ist das Problem, dass alternative Methoden zur Darstellung kaum ausführlich untersucht wurden.

1.2. Motivation

Gegenüber anderen Kommissioniermethoden hat Pick-by-Vision deutlich weniger Defizite. Anders als bei Pick-by-Paper haben wir beide Hände zur freien Verfügung und sind dadurch bei der Entnahme von Artikeln nicht eingeschränkt. Im Vergleich zu Pick-by-Light sind die Kosten, insbesondere bei der Skalierung, sehr gering. Pick-by-Voice erfordert ruhige Umgebungen, bei Pick-by-Vision sind Hintergrundgeräusche ein Faktor, der zu ignorieren ist. Die größte Schwäche ist jedoch, wie die Umsetzung realisiert wird. Die meisten Literaturquellen sprechen in diesem Zusammenhang von Head-Mounted-Displays. Durch den Einsatz eines Head-Mounted-Displays werden auch dessen Defizite mit übernommen. Reif et al. [RG09] berichten darüber, dass Teilnehmer bei Benutzerstudien, aufgrund des begrenzten Sichtfelds, über Orientierungs- und Gleichgewichtsproblemen klagten. Andere Teilnehmer klagten über Probleme mit der Tiefenwahrnehmung.

Jedoch sind Projektionen auch eine Möglichkeit, Pick-by-Vision umzusetzen. An der Universität Stuttgart versuchen Forscher durch das Projekt motionEAP³ zu zeigen, dass mithilfe von Projektion

³<http://www.motioneap.de>

und der Erkennung von Interaktionen eine hilfreiche Unterstützung bei Montage-Aufgaben möglich ist. Bei motionEAP handelt es sich um ein Assistenz-System, das Menschen durch in-situ-Projektion Arbeitsschritte anzeigt und Hilfestellungen bei Fehlern bietet [FKS14].

Im Rahmen dieses Projekts soll diese Diplomarbeit zeigen, dass auch eine mobile Version, die in einem Helm eingebettet ist, den Nutzer bei der Kommissionierung unterstützen kann, ohne dabei die Schwächen eines Head-Mounted-Displays zu haben.

Da die mobile Version in ein Helm eingebettet werden soll, sind die Hände und Füße frei. Während die Hände für die Entnahme bzw. Ablage von Gegenständen benötigt werden, haben die Füße den Vorteil, dass durch sie eine Interaktion mit einem projizierten Floor-Display möglich ist. Jeder "Treffer" innerhalb des Floor-Displays kann als Eingabe verstanden werden. Bereits in den 70er-Jahren erkannte man durch das Spiel "Twister"⁴, dass es Spaß machen kann, Gebiete innerhalb einer bestimmten Fläche mittels Füßen oder Händen zu erreichen.

Diese Diplomarbeit versucht für die Pick-by-Vision Methode eine Alternative zu Head-Mounted-Displays aufzuzeigen, ohne dessen Nachteile zu übernehmen. Jedoch sollten die Vorteile, die man mit Pick-by-Vision Systemen verbündet, weiterhin existent bleiben. Mittels drei Komponenten wird ein System entwickelt, das durch Augmented Reality eine Unterstützung bei der Kommissionierung sein soll. Bei den drei Komponenten handelt es sich um einen Beamer, eine Tiefenkamera und einen zu implementierenden Prototyp. Mittels Fußeingaben innerhalb eines Floor-Displays sind Interaktionen mit dem System möglich. Projizierte Richtungs-Pfeile weisen den Nutzer zu Entnahmef- bzw. Ablageorten. Benutzerstudien werden ausgeführt, um den zu entwickelnden Prototyp zu evaluieren.

1.3. Gliederung

Die Arbeit ist in folgender Weise gegliedert:

Kapitel 1 – Einleitung: dient dazu, den Leser in die Thematik einzuführen und ihm deutlich zu machen, welche aktuelle Problemstellung existiert und rechtfertigt somit den Sinn dieser Diplomarbeit.

Kapitel 2 – Forschungsstand: beschreibt die Grundlagen dieser Arbeit, die für das Verständnis erforderlich sind und präsentiert verwandte Projekte.

Kapitel 3 – Floor-Display-Prototyp: stellt den Prototyp für das entwickelte Floor-Display vor.

Kapitel 4 – Evaluierung des Floor-Display-Prototyps: präsentiert die Ausführung und die Ergebnisse der Benutzerstudie, die erforderlich waren, um den Prototypen zu evaluieren.

Kapitel 5 – Kommissionierungs-Prototyp: erweitert den bisherigen Prototypen, um die Unterstützung bei der Kommissionierung.

Kapitel 6 – Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps: präsentiert die Ausführung und die Ergebnisse der Hauptstudie, in welcher der realisierte Pick-by-Vision Ansatz gegenüber Pick-by-Paper verglichen wurde.

⁴<https://www.math.uni-bielefeld.de/~sillke/Twister/history/>

1. Einleitung

Kapitel 7 – Zusammenfassung und Ausblick: fasst die Resultate der Arbeit zusammen und stellt Anknüpfungspunkte vor.

2. Forschungsstand

Dieses Kapitel deckt die Bereiche ab, die für das Verständnis der Diplomarbeit erforderlich sind. Es wird außerdem ein Überblick über verwandte Forschungsarbeiten gegeben. Dies erfolgt in vier Unterkapiteln, welche die großen Themenbereiche umfassen, die in dieser Diplomarbeit von Bedeutung sind. Das fünfte Unterkapitel dient als Zusammenfassung.

Zuerst wird der Begriff der Augmented Reality erklärt. Anschließend folgt eine Erklärung zu projizierten Benutzeroberflächen und es werden verwandte ähnliche Forschungsarbeiten präsentiert sowie Probleme die bei Projektionen auftreten können.

Der dritte Bereich geht etwas tiefer ins Detail bezüglich der Interaktion für das zu entwickelnde Floor-Display, in dem es den Fuß als Eingabemöglichkeit untersucht, während der vierte Bereich den Begriff der Kommissionierung analysiert und andere bereits existierende Methoden für die Kommissionierung vergleicht. Das Kapitel wird durch eine Zusammenfassung abgeschlossen.

2.1. Augmented Reality

Der Begriff Augmented Reality gewinnt in unserer heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung, da dieser in zahlreichen verschiedenen Gebieten auftaucht. Selbst im Fernsehen haben Fußball-Fans bereits mehr oder weniger unterbewusst eine Beispielanwendung gesehen. Wenn bei einer Live-Übertragung beispielsweise Leistungsdaten eines Spielers oder die Distanz von der Freistoßposition zum Tor in Echtzeit angezeigt werden, ist dies ein triviales Beispiel für den Einsatz von Augmented Reality.

Die Einsatzbereiche bei denen Augmented Reality zum Vorschein kommt, sind zahlreich. Das obere Beispiel taucht im Unterhaltungsbereich auf. Eines der etwas älteren sehr bekannteren Beispiele ist die, für die Sony Playstation 2 veröffentlichte, Kamera EyeToy¹. Diese hat in unterstützten Spielen Menschen vor der Kamera auf dem Bildschirm angezeigt und diese mussten mit Händen und Füßen interagieren, um beispielsweise eingeblendete virtuelle Objekte aus dem Anzeigebereich zu bekommen.

Aber auch im mobilen Bereich, in Form von Smartphone Apps, taucht Augmented Reality auf. Auf das Kamerabild können Objekte eingeblendet werden, die man durch Klick-Gesten beseitigen muss. Eine sinnvollere Anwendung scheint die Benutzung von Informationen, die man durch das Smartphone erhält, zu sein. Ein Beispiel für die eigene Wohnung ist die Shopping-App von IKEA², die ausgesuchte Möbel aus dem IKEA Katalog in das Kamerabild einblendet, so dass der Nutzer sehen kann, ob diese farblich passen und vor allem, ob es auch von der Größe an die gewünschte Stelle passt.

¹<http://de.playstation.com/ps2/accessories/detail/item51693/EyeToy-USB-Kamera/>

²http://www.ikea.com/ca/en/about_ikea/newsitem/2014catalogue

2. Forschungsstand

Unterwegs helfen Apps wie Layar³, die basierend von den Bildinformationen der Kamera, GPS-Koordinaten oder anderen Daten, die vom Smartphone zur Verfügung gestellt werden, Informationen über Objekte innerhalb des Kamerabilds anzeigen, beispielsweise über ein berühmtes Monument. Außerdem können Navigationspfeile auf dem Kamerabild zum nächsten Restaurant oder Ähnliches angezeigt werden.

Neben dem Einsatz im privaten Bereich, sind auch in der Industrie Augmented Reality Systeme vorzufinden. In einem Artikel weisen Regenbrecht et al. [RBW05] auf verschiedene Einsatzgebiete innerhalb der Industrie hin, in denen bereits geforscht wurde. So wurde versucht, für Wartungsarbeiten innerhalb der ISS, ein Augmented Reality System einzuführen, dass auf einem Head-Mounted-Display basierte, was jedoch letztendlich an den hohen Anforderungen für Luft-und-Raumfahrt gescheitert war. Auch bei allen anderen geschilderten Einsatzgebieten waren die Prototypen nicht weit genug entwickelt, um zum produktiven Einsatz zur Verfügung zu stehen.

Ein anderes Einsatzgebiet, bei dem Augmented Reality in der Industrie noch zur produktiven Nutzung kommen wird, ist die Unterstützung beim Kommissionieren durch den Einsatz von Head-Mounted-Displays. Ein Beispiel für eine Firma, die sich darauf spezialisiert hat, ist die Firma Ubimax GmbH.⁴

Im Zuge des motionEAP Projekts versucht unter anderem die Uni-Stuttgart die Unterstützung bei manuellen Montage-Arbeiten durch ein auf Projektion basierendes Augmented Reality System [KFS15] zu verwirklichen. Während meistens die benötigten Teile durch technologische Hilfe (Pick-by-Light) angezeigt werden, gibt es kaum Hilfestellungen darüber, wie etwas zusammen gestellt werden kann. Insbesondere Arbeiter mit Handicaps haben hier Defizite. Abhilfe schaffen hier Systeme, die den Benutzer durch virtuelle Projektionen direkt auf dem Arbeitsplatz anzeigen können, wie die benötigten Teile zusammen gehören.

Anders als der Begriff der Virtual Reality (VR), in der kein Bezug zur Realität mehr vorhanden ist und sämtliche Erlebnisse rein virtueller Natur sind, ergänzt die Augmented Reality (AR) die Realität, die von uns wahrgenommen wird, mit reinen virtuellen Objekten. VR ist jedoch nicht das Gegenteil von AR, sondern dies wäre die Augmented Virtuality (AV). In dieser Darstellungsform befindet sich der Nutzer (optisch gesehen) in einer virtuellen Realität, in der jedoch Objekte aus der Realität eingeblendet werden. Während Head-Mounted-Displays als Beispiel für die Augmented Reality zu sehen sind, wäre die Oculus Rift⁵ das Beispiel für die Virtual Reality oder je nach Einsatzszenario auch für die Augmented Virtuality.

Milgram et al. [MTUK94] haben das so genannte: "Reality-Virtuality (RV) Continuum" eingeführt, und haben so die verschiedenen Darstellungsarten genauer unterschieden und als Oberbegriff für die Darstellungsformen, die zwischen der Realität und der virtuellen Realität liegen, den Begriff: "Mixed Reality" verwendet (siehe Abbildung 2.1).

Bei den Definitionen von Augmented Reality muss man zwischen zwei Verschiedenen unterscheiden. Caudell et al. [CM92] beschränken den Begriff der Augmented Reality auf eine spezifisch benutzte

³<http://www.layar.com>

⁴<http://blog.getameta.com/pioneer-profile-ubimax-gmbh/>

⁵<http://www.oculus.com>

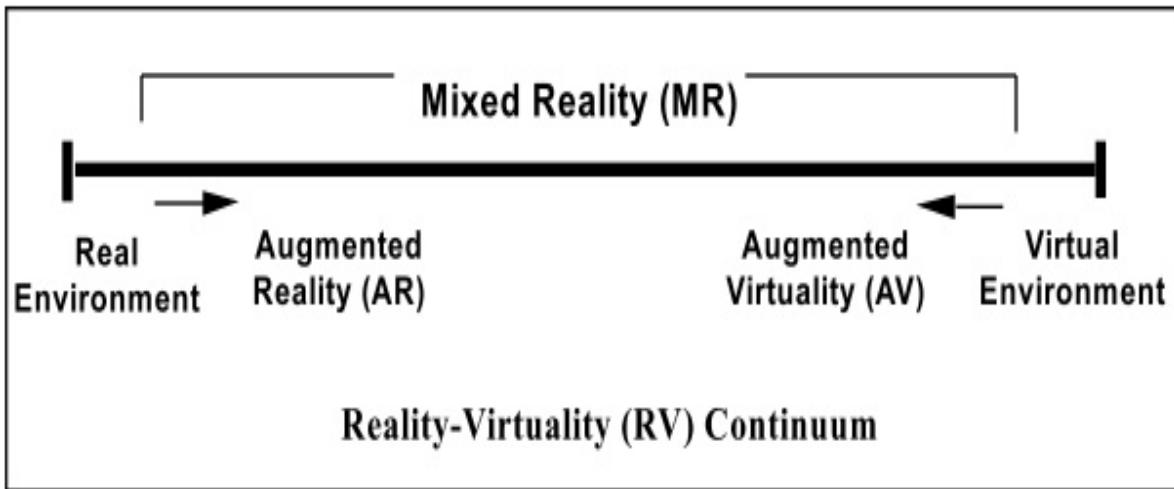


Abbildung 2.1.: Reality-Virtuality (RV) Continuum nach Milgram. Quelle: [MTUK94]

Technologie, welche die menschliche Wahrnehmung durch kontextbezogene Informationen erweitert und erwähnt sowohl textuell, als auch bildlich, Head-Up-Displays und Head-Mounted-Displays.

Ronald T. Azuma [Azu97] hingegen bezeichnet die Augmented Reality selbst als eine Variation der virtuellen Realität und meidet es, den Begriff anhand eingesetzter bestimmter Systeme zu definieren und definiert daher ein Augmented Reality System als ein System, das die drei folgenden Anforderungen erfüllt:

- Kombination der Realität und virtuellen Realität
- Interaktionen in Echtzeit
- 3D-Darstellung der virtuellen Inhalte in der Realität

2.2. Projizierte Benutzeroberflächen

1998 haben Underkoffer et al. [UI98] die Bezeichnung: "I/O Bulb" (Deutsch: Eingabe/Ausgabe Glühbirne) eingeführt, um damit atomare Einheiten zu beschreiben, die eine (fast) parallele Projektion und Bilderfassung anbieten. Dieser Begriff ist heute gleichzusetzen mit Projektor-Kamera-Systemen. Linder et al. [LM10] haben zwölf Jahre später auf den ursprünglichen Begriff Bezug genommen und das System, das damals mangels technischen Möglichkeiten nicht umgesetzt werden konnte, realisiert. Unter der Bezeichnung "LuminAR" haben sie ein System erschaffen, das große Parallelen zu einer handelsüblichen Tischlampe aufweist. Eine Projektor-Kamera-Kombination entspricht der Glühbirne, ein Roboterarm dem Rest der Lampe. Durch den Roboterarm ist es dem System möglich, die Projektionsfläche an unterschiedlichen Orten innerhalb dessen Reichweite zu verschieben. Aber auch die Benutzung des Systems als herkömmliche Lichtquelle oder Webcam ist möglich. Eine andere Umsetzung hat Pinhanez [Pin01] vorgestellt, die eine Alternative zum Transport von Notebooks und

2. Forschungsstand

dem Aufstellen von verschiedenen Bildschirmen darstellen soll. Mittels einem stationären Projektor, einem motorisierten Spiegel sowie einer Videokamera, soll die Umsetzung eines "Everywhere Displays projector" realisiert werden. Durch den Spiegel ist es möglich, an unterschiedliche Positionen innerhalb eines Raums hin zu projizieren. Die Videokamera dient dazu, Interaktionen zu erfassen. Um Verzerrungen der Projektionsfläche zu verhindern, wird eine virtuelle 3D-Kamera vorgeschlagen, die manuell kalibriert werden muss. Dies dauert je nach Oberfläche 15-20 Minuten, bis die Verzerrung dadurch korrigiert wurde.

Neben den beiden vorgestellten stationären Projektionssystemen, sind auch Systeme entwickelt worden, die als mobil bezeichnet werden.

Karitsuka et al. [KS03] weisen in ihrer Forschungsarbeit auf die Vorteile eines tragbaren Kamera-Projektor-Systems gegenüber einem Head-Mounted-Display hin. Es werden drei Vorteile genannt.

1. Linderung der negativen Beeinträchtigungen beim Tragen von Head-Mounted-Displays.
2. Durch die Projektion können auch andere, die das System nicht selbst benutzen, von den Augmented Reality Inhalten profitieren.
3. Der Benutzer erhält ein stärkeres 3D-Feeling, da die virtuellen Objekte direkt angezeigt werden.

Ihr mobiles System gleicht einer Tasche, die man auf dem Rücken tragen muss, in der sich der Projektor, ein Notebook, eine Kamera, sowie ein Infrarot-Lichtmodul befinden haben. Über eine Fingerkappe mit einem Infrarot-Modul, wurden Interaktionen erkannt. Projektionen werden gerade aus auf ebene Flächen projiziert.

Harrison et al. [HBW11] haben 2011 ihr System: "OmniTouch" vorgestellt, das aus einem Pico-Projektor und einer Tiefenkamera besteht, welches auf der Schulter getragen wurde. Anders, als das System von Karitsuka et al. [KS03], war man nicht mehr in der Auswahl der möglichen Projektionsflächen beschränkt, sondern konnte die eigenen Körperteile, wie Hände und Arme, auch als mögliche Oberflächen für die Projektion benutzen. Durch ihren Algorithmus waren sie in der Lage mittels Tiefeninformationen, Interaktionen ohne vorherige aufwendige Kalibrierungen auf allen möglichen Flächen zu erkennen.

Für das Projektor-Kamera-System von Winkler et al. [WSDR14] namens "AMP-D" (Ambient Mobile Pervasive Display) musste ein Rucksack mit den notwendigen Komponenten getragen werden. Zu diesen gehörten eine Tiefenkamera, ein Projektor, ein Notebook und Akkus. Der Projektor befand sich 25 Zentimeter über der Schulter des Benutzers. Die Projektion wird hier unmittelbar vor den Benutzer auf den Boden projiziert oder je nach Kontext auf seine Hand (beispielsweise für private Informationen). Die Interaktion erfolgt über Handgesten, welche über eine Tiefenkamera erkannt werden.

Huber [Hub14] gibt über weitere Forschungsarbeiten im Bereich der mobilen projizierten Benutzeroberflächen einen guten Überblick.

Probleme bei der Projektion

Obwohl durch Projektionen viele Nachteile von Head-Mounted-Displays gelöst werden, entstehen auch neue Probleme. Diese kann man in unterschiedliche Bereiche aufteilen [SPHK08]. Es fängt bereits mit den *allgemeinen Problemen* an. Obwohl es sich trivial anhört, kann es bereits ein Problem

sein, eine geeignete physikalische Oberfläche zur Verfügung zu haben, auf welche die Projektionsfläche geworfen werden soll. Dies limitiert bereits die Menge sowie Komplexität der anzuzeigenden Informationen. Einer der eigentlichen Vorteile von Projektionen ist, dass mehrere Personen zeitgleich Informationen liefern können. Dies ist jedoch genau so auch ein Nachteil, wenn nur eine Person Inhalte sehen darf, bzw. Eingaben auf die projizierte Benutzeroberfläche vornehmen darf. Projektionen sind stark abhängig von der Umgebungsbeleuchtung, was zu *optischen Problemen* führt. Die Darstellungsqualität der Projektion ist nicht nur direkt von der Beleuchtung, sondern auch von der Umgebung generell abhängig. Je nach Material der Oberflächen, können diese besser oder schlechter das Licht der Projektion reflektieren, was im schlimmsten Fall dazu führen kann, dass die Projektion kaum zu erkennen ist.

Als dritte Problematik sind *geometrische Probleme* zu nennen. Da Projektionen eine Oberfläche benötigen, können hier je nach Winkel zwischen Projektor und Oberfläche Verzerrungen auftreten, die dafür sorgen, dass die Projektion kaum zu erkennen ist. Dies ist über effiziente Algorithmen für die Kalibrierungen zu lösen.

2.3. Fußeingabe

Wenn man an Eingabemöglichkeiten denkt, haben die meisten Computer-Nutzer Tastatur und Maus im Kopf. Diese werden über die Hände benutzt. Wenn der Denkvorgang nun weiter in Richtung direkte Eingabemöglichkeiten geht, denkt man unweigerlich an Hände bzw. Finger, aufgrund heutiger Smartphones, Tablets und ähnlichen Geräten mit einem Touchscreen. Doch mit Händen sind auch Probleme verbunden. Was ist, wenn diese gerade schmutzig sind oder nicht zur Verfügung stehen, weil man beispielsweise etwas in der Hand hat oder aufgrund der Kälte dicke Handschuhe trägt, die eine Benutzung von Touchscreens ebenfalls nicht ermöglichen. Hier eignet sich der Fuß als Alternative wunderbar.

Es kann für die Fuß-Interaktion zwischen drei unterschiedlichen Fuß-Gesten unterschieden werden [AHJ⁺12]. Die erste der drei Kategorien ist: *Kicking*. Han et al. [HAK⁺11] haben bei ihrer Forschungsarbeit den Begriff "Kicking" vom Kontext Fußballspielen abgeleitet, ihn jedoch im Rahmen ihrer Forschung als Bewegung der unteren Hälfte des Beines in eine spezifische Richtung definiert. Im Rahmen einer Studie, bei der die Bewegung des Beines mittels einer Tiefenkamera erfasst wurde, haben sie herausgefunden, dass die Probanden der Studie zwischen zehn unterschiedlichen Kick-Gesten unterscheiden konnten und zwar fünf Richtungen und zwei Winkel. Durch die zehn verschiedenen Kombinationen ist eine Übertragung auf Menüselektionen und Ähnliches möglich.

Als zweite Kategorie dient: *Foot-Tapping*. Unter Foot-Tapping wird das normale Auftreten des Fußes verstanden. Im Regelfall benutzen wir unsere Füße zum sicheren Stand bzw. zur Fortbewegung. Nun könnte man meinen, dass aufgrund dessen, diese bereits ihre Aufgaben haben und deshalb ebenfalls nicht zur Verfügung stehen. Dies wird als falsch eingestuft, wie die nachfolgende Studie belegt. Selbst während der Mensch sich bewegt, kann er seine Füße als Interaktions-Werkzeug benutzen.

Im Jahr 2008 wurde ein System vorgestellt, dass es Menschen ermöglicht, während dem Joggen Füße als Eingabegeräte für simple Kommandos (Auswahl, Abbruch und Scrollen in zwei Richtungen) zu verwenden [YTY08]. Auf den Schuhen wurde hierfür ein kleiner Beschleunigungssensor angebracht, der mit einem Mikrocomputer kommuniziert. Dieser hat die empfangenen Informationen anschließend

2. Forschungsstand

an einen Computer im Netzwerk gesendet, der die Schritte auf das jeweilige Kommando abgebildet hat. Dadurch war es möglich, während dem Joggen mit einem Ausfallschritt in eine spezifische Richtung und/oder dem aufeinanderfolgenden Auftreten von dem linken bzw. rechten Fuß, mit dem System zu interagieren, ohne dass der Jogging-Vorgang unterbrochen werden musste. Dieses wurde anschließend durch die Benutzung bzw. Steuerung eines MP3-Players beim Joggen evaluiert.

Die dritte und letzte Art der Interaktion betrifft das Fußgelenk und wird als *ankle rotations* bezeichnet. Scott et al. [SDYT10] haben in ihrer Forschungsarbeit untersucht, wie viele verschiedene Gesten mit einer Bewegung aus dem Fußgelenk möglich sind. Es wurde dabei zwischen vier verschiedenen Arten unterschieden.

- **Dorsalflexion:** Beugung des Fußes nach dem Fußrücken.
- **Plantarflexion:** Beugung des Fußes nach den Zehen.
- **Fußballen-Rotation:** Rotation des Fußes mit den Fußballen am Boden.
- **Zehen-Rotation:** Rotation des Fußes mit den Zehen am Boden.

Die Messungen wurden in der ersten Studie mittels Marker vorgenommen. Da Marker außerhalb einer dafür bestimmten Umgebung keinen Sinn machen, wurde in der zweiten Benutzerstudie der Beschleunigungssensor eines handelsüblichen Smartphones verwendet. Bei der ersten Studie wurde erkannt, dass das System zwischen zehn verschiedenen Fußgesten unterscheiden kann.

In den drei oben genannten Kategorien ist die Anzahl an unterschiedlichen erkannten Fuß-Interaktionen überschaubar. Dies trifft zu, wenn außer der eigentlichen Erkennung der Interaktion in Form von Beschleunigungssensoren, Marker oder Tiefenkamera keine weitere Technik für die Interaktion verwendet wird. Das Merken von zahlreichen verschiedenen Fuß-Gesten ist zudem sehr schwer.

Aus diesem Grund wird der Boden in anderen Forschungsarbeiten mit benutzt, indem dieser mit Technik versehen wird, dementsprechend ein Floor-Display installiert wird. Eines der größten Projekte, dass als Schwerpunkt ein mit dem Fuß zu bedienendes Floor-Display hat, ist Multitoe [AKM⁺10]. Das Floor-Display basiert auf einem *frustrated total internal reflection (FTIR)* Ansatz [Han05], welches über Druck direkte Interaktionen ermöglicht. Das Floor-Display ist in der Lage zu unterscheiden, ob Menschen mit dem System bewusst interagieren und bietet eine Erkennung von mehreren Benutzern an. Um selbst bei kleinen Flächen eine gezielte Interaktion zu ermöglichen (z.B. eine Taste auf einer virtuellen Tastatur), wird die Fläche mit der Interaktionen erzielt werden können, vom gesamten Fuß lediglich auf einen Hotspot, der sich unterhalb der Zehen in etwa befindet, verkleinert. Mittels Abdruck der Sohlen können die Benutzer unterschieden werden. Oben beschriebene Fußgesten dienen als Eingabemöglichkeiten.

2.4. Kommissionierung

Wie bereits in der Einleitung erläutert, fallen über 50 Prozent der Kosten in modernen Lagerhäusern auf die Kommissionierung an, weshalb eine Optimierung dieser Aufgabe und damit eine Senkung der Kosten im Interesse der Inhaber von Lagerhäusern ist. Nach Aussagen von Tompkins [Tom10] fallen über 70 Prozent des Zeitaufwands der Mitarbeiter darauf, um von A nach B zu gelangen und

die jeweiligen Posten des Auftrags zu suchen. Obwohl sich 70 Prozent bereits nach einer hohen Zahl anhört, ganz gleich, wie hoch die Gesamtsumme ist, sind diese Kosten dennoch niedriger, als die zusätzlichen Kosten, die anfallen können, wenn es zu Fehlern bei der Kommissionierung gekommen ist. Idealerweise fallen nur die Kosten an, die für die Korrektur der Lieferung anfallen. Im schlimmeren Fall führen diese Fehler zu einem Verlust des Kunden und können sich auch auf zukünftige Bestellungen auswirken, wenn der Kunde seine evtl. negative Meinung öffentlich macht. Der Ruf einer Firma ist der zweit wichtigste Einflussfaktor bei Online-Bestellungen [com15].

Die Kommissionierung muss man in zwei unterschiedliche Bereiche aufteilen. Der erste Bereich ist die Vorgehensweise, der andere die verwendete Methode.

Vorgehensweisen bei der Kommissionierung

Es gibt zwei verschiedene Systeme, wie die Kommissionierung abläuft: *picker-to-parts* (Arbeiter-zu-Waren) und *parts-to-picker* (Waren-zu-Arbeiter) [KLDJR06]. Wie der Name bereits darauf schließen lässt, hängt es davon ab, was in Bewegung sein muss, entweder die Waren oder der Arbeiter. Während beim Erstgenannten der Arbeiter selber zu den Waren laufen bzw. fahren muss und dabei durch eine spezifische Kommissioniermethode unterstützend geführt wird, hat der Arbeiter beim zweiten System eine feste Position und muss nur auf die Artikel warten. Der größte Nachteil ist hierbei, dass das System keine gute Flexibilität anbietet und mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Da in dieser Diplomarbeit nur die Vorgehensweise picker-to-parts von Interesse ist, wird auf eine genauere Vorstellung der anderen Vorgehensweise verzichtet.

Für die Vorgehensweise picker-to-parts haben Koster et al. [KLDJR06] zwei verschiedene Unterarten definiert, die sich anhand der Positionen der zu entnehmenden Artikel unterscheiden.

Low-Level-Systeme sehen vor, dass sämtliche Waren von Arbeitern, ohne den Einsatz von technischen Hilfsmitteln, zu erreichen und zu transportieren sind. Technische Hilfsmittel sind zwar optional, um beispielsweise größere Distanzen schneller zu überbrücken, jedoch nicht notwendig. Regale sind nur so hoch, wie sie ein normal ausgewachsener Erwachsener erreichen kann. Außerdem müssen keine Waren transportiert werden, die ein höheres Gewicht aufweisen.

High-Level-Systeme sehen vor, dass der Einsatz von technischen Hilfsmittel nun nicht mehr optional, sondern erforderlich ist. Die Regale können nun mehrere Meter hoch sein und bei den zu transportierenden Waren kann es sich nun auch um Paletten handeln, die den Einsatz eines Krans oder Gabelstaplers benötigen. Der Kran muss dann von einem Menschen bedient werden.

Abseits der beiden zentralen Vorgehensweisen, existieren noch Sub-Vorgehensweisen. Diese definieren, wie die einzelnen Waren gesammelt werden.

Beim *Discrete-Picking* hat ein Arbeiter die Verantwortung für einen Auftrag, dessen Posten er in einer Tour zusammen stellen muss. Es ist nicht gestattet, mehrere Aufträge parallel zu bearbeiten. Aufgrund der Simplizität stellt er auch die normale Vorgehensweise beim Kommissionieren dar und wird auch außerhalb von reinen Warenlagern benutzt. Ein Beispiel hierfür sind Geschäfte, bei denen der Kunde warten muss, bis seine angeforderten Artikel an die Kasse gebracht werden [Eis08].

Batch-Picking definiert das Gegenteil vom Discrete-Picking. Es ist nun explizit erlaubt und auch gefordert, dass mehrere Aufträge parallel bearbeitet werden. Dies kann auf zwei unterschiedliche Arten

2. Forschungsstand

geschehen. Entweder erfolgt die Zuordnung der Artikel direkt nach der Entnahme, beispielsweise durch den Einsatz verschiedener Boxen auf einem großen Transportwagen oder nach der Entnahme aller Artikel aus den Aufträgen [PM08].

Zone-Picking sorgt für eine Aufteilung des Warenlagers in unterschiedliche Gebiete. Der Vorteil liegt darin, dass Bereiche, die für einen spezifischen Auftrag uninteressant sind, ignoriert werden können. Wie auch beim Batch-Picking existieren hier zwei verschiedene Unterarten. Entweder wird sequentiell gearbeitet, was bedeutet, dass Aufträge nacheinander abgearbeitet werden, oder es erfolgt simultan, was eine gleichzeitige Bearbeitung mehrere Aufträge bedeutet. Der Nachteil liegt darin, dass wie auch beim Batch-Picking mehr oder weniger Zeit für die Zuordnung der einzelnen Aufträge gebraucht wird [PM08].

Methoden für die Kommissionierung

Da eine Vielzahl von Kommissioniermethoden existieren, beschränken wir uns auf die fünf bekanntesten Arten, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Pick-by-Paper

Hierbei handelt es sich um die älteste und kostengünstigste Methode. Arbeiter bekommen ein Blatt Papier, auf dem die Anweisungen stehen. Im Regelfall sind folgende Informationen für einen Auftrag enthalten: Artikelbezeichnung, Menge sowie die Entnahmee- und Ablageorte. Es können ebenfalls weitere Informationen vorhanden sein, wie eine Beschreibung des Artikels, Kosten oder Ähnliches. Die gängigste Form ist die Textform. Aber auch eine grafische Version, auf dem Regalfächer mit Markierungen abgebildet werden, ist gebräuchlich.

Um sicherzustellen, dass eine Zuordnung des Entnahmorts von der Packliste zum Entnahmeart im Warenlager möglich ist, brauchen sämtliche Regalfächer (oder ähnliche Konstrukte) eindeutige Bezeichnungen, z.B. A4-5A845.

Da einfache Papierschilder bereits ausreichen und deren Austausch schnell möglich ist, bietet diese Methode eine sehr hohe Flexibilität mit zeitgleich niedrigen Kosten. Ebenfalls müssen Arbeiter nicht lange eingelernt werden, um Anweisungen innerhalb einer Packliste zu verstehen [Bau13].

Pick-by-Voice

Anders als Pick-by-Paper, benötigt dieses Konzept bereits zwei technische Hilfsmittel. Jeder Arbeiter muss ein Headset für die Kommunikation benutzen sowie einen kleinen tragbaren Mini-Computer mit sich führen, über den die Auftragsverwaltung abläuft. Der Mini-Computer versorgt den Arbeiter mit den Aufgaben, die er zu erledigen hat. Durch eine Spracherkennungs-Software, kann dieser mit dem System interagieren. Alternativ ist auch eine Kombination mit einem Barcodescanner oder einer Bildschirmeingabe möglich.⁶ Der größte Vorteil liegt darin, dass der Arbeiter beide Hände frei hat,

⁶<http://www.ssi-schaefer.de/foerder-und-kommissioniersysteme/manuelle-kommissionierung/pick-by-voice.html>

während der größte Nachteil darin liegt, dass diese Methode nur für eher ruhige Warenlager geeignet ist, bei denen eine zuverlässige Spracherkennung auch möglich ist [Bau13].

Pick-by-Light

Bei dieser Kommissioniermethode wird ebenfalls der Arbeiter durch Technik unterstützt. Bei sämtlichen Entnahmestellen sind Licht-Tafeln montiert, die dem Arbeiter durch ein Aufleuchten anzeigen können, von wo er wie viele Artikel entnehmen muss für seinen momentanen Auftrag⁷. Der größte Vorteil liegt in der höheren Geschwindigkeit und vor allem darin, dass der Nutzer auch hier beide Hände frei hat. Der größte Nachteil liegt darin, dass das System nur stationär ist und deshalb kaum Flexibilität aufweist. Die Skalierbarkeit ist ebenso nur sehr schlecht, da für jede neue Entnahmestellung neue Licht-Tafeln benötigt werden [SRG⁺⁰⁹].

Pick-by-Vision

Der letzte zu betrachtende Ansatz ist Pick-by-Vision. Hierfür werden zwei unterschiedliche technische Komponenten benötigt. Die Erste ist eine Komponente, die dem Nutzer direkt visuell darstellen kann, von wo er die Artikel genau entnehmen muss. Die andere Komponente muss Interaktionen erkennen können. Diese beiden Komponenten dienen auch als Grundvoraussetzung für Augmented Reality. Die meisten Literaturquellen geben als technische Komponente für die Visualisierung ein Head-Mounted-Display an, jedoch ist der Ansatz nicht darauf beschränkt. Es stehen hier unterschiedliche Möglichkeiten bereit, inwiefern die visuellen Anweisungen auszusehen haben. Schwerdtfeger et al. [SRG⁺⁰⁹] geben verschiedene Möglichkeiten als Beispiele an. Darunter Navigationspfeile und ein Hervorheben durch eine einfache Box. Zu den Schwächen der Pick-by-Vision Methode gehören die Probleme, die bei der Benutzung von Head-Mounted-Displays auftreten können, wie beispielsweise Kopfschmerzen.

Es gibt bereits einige Studien, die die verschiedenen Methoden untereinander verglichen haben. Guo et al. [GRX⁺¹⁴] haben entdeckt, dass die Zeit-Performance eines Wagen-montierten-Displays besser war, als bei Pick-by-Paper, Pick-by-Light, und Pick-by-Vision.

Neben der Geschwindigkeit, ist die Fehler-Performance von entscheidender Bedeutung. Um diese zu messen, wird oft zwischen den vier folgenden Fehler-Typen [RGG12] unterschieden:

- **Typ-Fehler:** Fehler, die aufgrund des Vertauschens der Entnahmestellung auftreten.
- **Mengen-Fehler:** Fehler, die aufgrund einer zu hohen oder zu niedrigen Entnahmemenge auftreten.
- **Auslassungs-Fehler:** Sonderform des Mengenfehlers. Ein Posten wurde vollständig ausgelassen.
- **Zustands-Fehler:** Fehler, die aufgrund einer unbewussten Beschädigung oder falschen Etikettierung einer Ware entstehen.

⁷<http://www.kbs-gmbh.de/>

2. Forschungsstand

Diese Fehlerarten können aufgrund von verschiedenen Ursachen auftreten. Nach Rammelmeier et al. [RGG12] können diese in vier unterschiedliche Kategorien aufgeteilt werden.

- **Mensch:** Unachtsamkeit, Verschätzen, Verzählen, Diebstahl...
- **Methode:** unpräzise Waage, verschachtelte Artikel, Schätzung...
- **Umfeld:** mangelhafte Beleuchtung, Beschriftungen schlecht/nicht lesbar...
- **Sonstiges:** fehlende Artikel, kaum zu unterscheidende Artikel...

Während zu der Kategorie Mensch auch weniger sofort offensichtliche Ursachen wie Diebstahl und vorzeitiges Quittieren dazu zählen, gehören zur Kategorie Methode nur Ursachen, die relativ offensichtlich sind, da diese sich explizit auf die verwendete Kommissioniermethode beziehen.

Obwohl es noch nicht empirisch bewiesen wurde, sehen viele den Faktor Mensch als häufigste Fehlerquelle, da dieser aufgrund Unachtsamkeit zu Fehler neigen kann.

Durch den Druck - insbesondere Zeitdruck - der auf vielen Arbeitnehmern liegt, wird dies noch verstärkt.

Um die Anzahl an Fehlern zu senken, gibt es viele unterschiedliche Ansätze. Obwohl der erste Gedanke dahin geht, durch Automatisierung den Fehlerverursacher Mensch als potentielle Fehlerquelle zu beseitigen, ist dieser Denkansatz nicht immer der Richtige, da auch bei automatisierten Systemen der Faktor Mensch eine große Bedeutung hat.

Nach Rammelmeier et al. [RGG12] ist der beste Ansatz, moderne Kommissioniermethoden zu benutzen. Diese beinhalten den Einsatz von technischen Hilfsmitteln, welche bereits deutlich geringere Fehlerzahlen aufweisen, als es bei Pick-by-Paper der Fall ist.

2.5. Zusammenfassung und Diskussion

Neben Beispielen für Augmented Reality aus Privat- und Industriebereich wurden zwei unterschiedliche Definitionen aufgezeigt, die Augmented Reality anhand der Nutzung bestimmter Geräte definiert haben [MTUK94, CM92] oder als eine Technologie, die Realität und virtuelle Realität kombiniert, in Echtzeit mit dem Anwender interagiert und im 3D-Raum wirksam ist [Azu97]. Es wurden anschließend Projekte, die projizierte Benutzeroberflächen realisiert haben, vorgestellt, die in stationäre [Pin01, LM10] und mobile Systeme [WSDR14, HBW11] unterteilt wurden. Außerdem wurden Probleme erläutert, die bei Projektionen auftreten können. Zu diesen gehören unter anderem schlechte Lichtverhältnisse und Verzerrungen bei den Projektionen. Da die Hände nicht immer zur Verfügung stehen, um Interaktionen auszuführen, wurde der Fuß als Eingabemöglichkeit untersucht und drei unterschiedliche Gesten aufgeführt: Kicking, Foot-Tapping und ankle rotations. Da der Fuß allein noch nicht ausreicht, um eine Konkurrenz zur Maus darzustellen, wurde mit Multitoe [AKM⁺10] ein Beispiel aufgezeigt, indem ein Floor-Display als Bildschirmsatz vorgestellt wurde, bei dem zwischen den verschiedenen Fuß-Gesten unterschieden wird. Abschließend wurden die beiden Vorgehensweisen bei der Kommissionierung picker-to-parts und parts-to-picker vorgestellt, sowie die Sub-Vorgehensweisen Discrete-Picking, Batch-Picking und Zone-Picking. Da neben den Vorgehensweisen auch die Methoden von entscheidender Bedeutung sind, wurden die Kommissioniermethoden Pick-by-Paper, Pick-by-Voice, Pick-by-Light und Pick-by-Vision mit ihren Schwächen und Stärken

2.5. Zusammenfassung und Diskussion

beschrieben. Das Unterkapitel wurde abgeschlossen durch die Fehlerarten, die beim Kommissionieren auftreten können.

Das Hauptproblem bei der Kommissionierung ist die Tatsache, dass keine Methode existiert, die nicht über mehrere Schwächen verfügt. Der Pick-by-Vision Ansatz ist zwar vielversprechend und benutzt heutige Technologien, scheitert jedoch an den existierenden Problemen der Head-Mounted-Displays, wie beispielsweise eine Einschränkung des Sichtfelds. Da es nicht eindeutig festgelegt ist, wie die Informationen visuell dargestellt werden müssen, eignet sich eine Projektion genauso gut. Funk et al. [FSSM⁺15] haben mit ihrem System OrderPickar bereits gezeigt, dass Projektionen bessere Ergebnisse bei den mentalen Anforderungen, der Fehlerrate und der benötigten Zeit liefern, als bereits existierende Pick-by-Vision Ansätze. Die Schwäche am System ist, dass es als stationär zu bezeichnen ist.

Um dieses Manko zu beheben, wird ein Projektorhelm konstruiert, der mittels Projektion als technisches Hilfsmittel für die Pick-by-Vision Methode verwendet wird. Um mit dem zu entwickelnden System zu interagieren, wird ein projiziertes Floor-Display verwendet, mit dem der Nutzer mittels Fußgesten interagieren kann. Der Vorteil gegenüber Systemen wie Multitoe [AKM⁺10] liegt darin, dass aufgrund der Projektion keine weiteren technischen Komponenten benötigt werden und es nur sichtbar ist, wenn der Nutzer es braucht. Abhängig von der Blickrichtung wird zwischen Floor-Display und Kommissionierungs-Modus unterschieden.

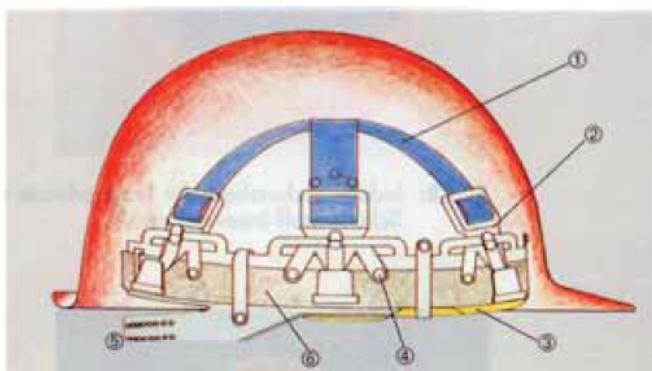
Das nächste Kapitel fängt damit an, das entwickelte Floor-Display genauer zu beschreiben.

3. Floor-Display-Prototyp

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie die Interaktion mit dem zu entwickelnden System auszusehen hat. Diese wird mittels Einsatz eines projizierten Floor-Displays ermöglicht. Hierfür werden mehrere Komponenten benötigt, die zuerst unter dem Punkt Aufbau beschrieben werden. Anschließend wird auf die entwickelten Funktionalitäten des Floor-Displays eingegangen, dem eine Erklärung zur Visualisierung folgt. Das Kapitel wird abgeschlossen durch eine Beschreibung, wie der Algorithmus zur Erkennung von Fußinteraktionen funktioniert.

3.1. Aufbau

Die erste Kernkomponente ist ein Helm. Wir haben uns für einen Helm entschieden, um die Unterschiede zu einem Head-Mounted-Display (HMD) möglichst gering zu halten. Wie auch beim HMD, ist die Ausrichtung des Kopfes entscheidend. Je nach Bewegung bzw. Neigung des Kopfs, ändert sich auch dadurch die Position der Projektionsfläche, so dass sich diese ständig in der Sichtfläche des Helmträgers befindet. Da eine Vielzahl an unterschiedlichen Helm-Arten existiert, entschied man sich speziell für einen Bauarbeiterhelm, der die Norm DIN EN 397 [DIN13] erfüllt. Abbildung 3.1 zeigt den Querschnitt eines Industrieschutzhelms, welcher dem inneren Aufbau von unserem verwendeten Helm entspricht. Durch die innere Struktur soll ein möglichst guter Sitz gewährleistet werden. Unser Helm beinhaltet zusätzlich einen Kinnriemen, um den Helm an den Kopf zu fokussieren.



- | | |
|--|--|
| 1 Textiltrageband | 5 Kopfgrößeneinstellung – sehr guter Sitz und hervorragender Halt bei allen Kopfstellungen durch speziell entwickeltes, tiefliegendes Nackenband |
| 2 Textilaufhänger, verschiebar | 6 zusätzliche Polsterung durch Schaumstoffstreifen |
| 3 Schweißband aus haufreundlichem Nomaz-Spezialmaterial | |
| 4 Befestigung für Kinnriemen, Gabel-Kinnriemen, Nackenschutz | |

Abbildung 3.1.: Aufbau eines Industrieschutzhelms. Quelle: [Ber06]

3. Floor-Display-Prototyp



Abbildung 3.2.: Darstellung des konstruierten Projektorhelms.

Die Abbildung 3.2 zeigt den Projektorhelm. Wir haben einen Industrieschutzhelm an der Oberseite aufgeschnitten, um die anderen Komponenten in den Helm zu integrieren. Ebenso wurde die Blende stark verkürzt, um das Sichtfeld des Trägers zu verbessern und das Gewicht nebenbei leicht zu reduzieren.

Die zweite Komponente ist eine rechteckige Plastikplatte, mit 11,5 cm Breite und 18 cm Länge. Auf dieser wurde ein kleiner Beamer und eine Tiefenkamera befestigt. Beide werden durch mehrere Gummibänder auf der Platte fixiert. Die Plastikplatte mit der Kombination aus Beamer und Kamera befindet sich im Inneren des aufgeschnittenen Helms und ist in Ausbuchtungen eingeklemmt. Zusätzlich wird der Halt von der Platte mittels Klebeband gesichert.

Tiefenkamera

Die Kamera, die unter dem Namen "Microsoft Kinect"¹ bekannt ist, wurde in erster Linie für den Einsatz in Videospielen für die Xbox 360 entwickelt. Ihre Aufgabe war es Gesten und Körperbewegungen zu erkennen und diese an die Spiele weiterzuleiten. Mehrere Monate später wurde eine leicht modifizierte Version auch für Windows-Nutzer veröffentlicht. Diese spezielle Version der Kinect erfüllt sämtliche Anforderungen, die wir aufgestellt haben.

Die erste Anforderung ist, dass die Tiefenkamera keine Marker oder sonstige Hilfsmittel benötigen darf, um Tiefeninformationen liefern zu können. Um eine effiziente Programmierung zu gewährleisten, muss außerdem für die Tiefenkamera ein umfassendes Software Development Kit (SDK) vorhanden sein. Die dritte und wichtigste Anforderung ist, dass die Kamera Bereiche von 45 bis 200 Zentimeter Entfernung erfassen muss. Die Obergrenze ist erforderlich, da wir beim Floor-Display den Abstand

¹<http://www.golem.de/1011/79226.html>

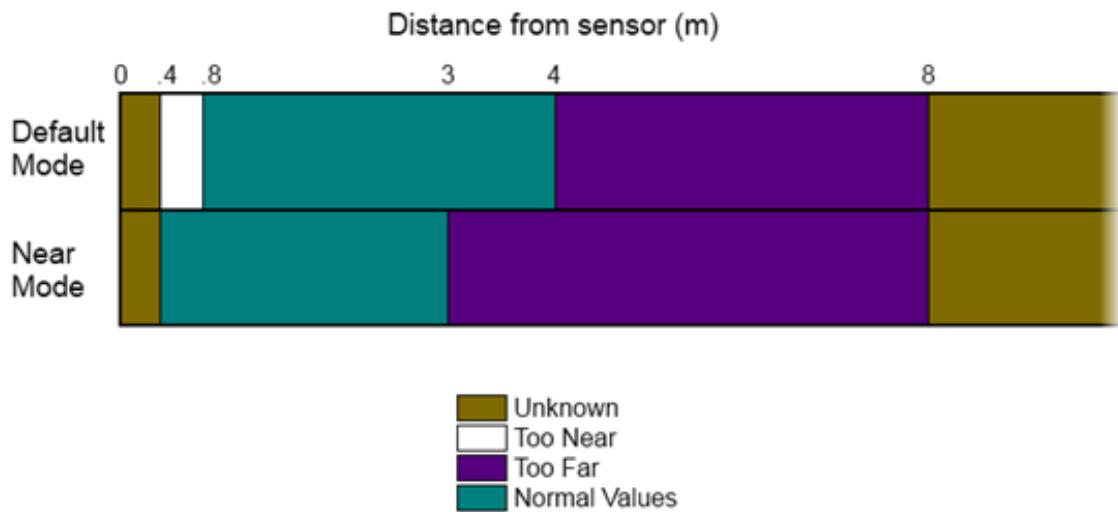


Abbildung 3.3.: Vergleich zwischen dem Default Mode und dem Near Mode der Kinect for Windows.
Quelle: Microsoft⁵

vom Kopf bis zum Boden benötigen, um Interaktionen des Fußes zu erkennen. Die Untergrenze ist nötig, da wir nicht nur Interaktionen für das zu entwickelte Floor-Display erfassen wollen, sondern auch eine Pick-Detection später realisieren müssen, die eine durchschnittliche Armlänge als Abstand benötigt.

Die Kinect liefert Tiefeninformationen, sogar ab 40 Zentimeter Entfernung, was bei einem Großteil der auf dem Markt erhältlichen Tiefenkameras selten ist. Eine Tiefenkamera, die von vielen als Alternative zur Kinect bezeichnet wird, ist die "Asus Xtion Pro"². Vergleiche der beiden Tiefenkameras zeigen jedoch, dass diese "Alternative" für uns keine Rolle spielt, aufgrund der Mindestentfernung von 80 Zentimeter, die nötig sind, um Interaktionen zu erkennen [NTDM13]. In diesem Vergleich wird zwar die Mindestdistanz auch bei der Kinect mit 80 Zentimetern betitelt, dies gilt jedoch nur für die Kinect, die für die Xbox 360 veröffentlicht wurde. Dies macht auch einen der wenigen Unterschiede aus, im Vergleich zu der von uns benutzten Kinect for Windows³.

Obwohl mittlerweile die Kinect V2⁴ auf dem Markt ist, haben wir uns, wegen der Untergrenze von 40 Zentimetern Entfernung dazu entschlossen, das Vorgängermodell zu verwenden, da ein so genannter "Near-Mode" in der aktuellen Version nicht mehr vorhanden ist, genauereres dazu in der Abbildung 3.3.

²http://www.asus.com/de/Multimedia/Xtion_PRO/

³<http://www.kinectingforwindows.com/2012/09/07/what-is-the-difference-between-kinect-for-windows-kinect-for-xbox360/>

⁴<https://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>

⁵<http://blogs.msdn.com/b/kinectforwindows/archive/2012/01/20/near-mode-what-it-is-and-isn-t.aspx>

3. Floor-Display-Prototyp

Beamer

Um das Floor-Display auch anzuzeigen, wird ein Beamer benötigt. Da man Beschränkungen in der Größe hat, haben wir uns für den "Philips PicoPix 3610"⁶ entschieden. Einer der Vorteile des Beamers ist die kabellose Benutzung, auf die wir jedoch wegen mehreren Gründen verzichtet haben. Zum Einen haben wir durch die verwendete Tiefenkamera bereits ein notwendiges Kabel, zum Anderen ist die Akkulaufzeit von maximal zwei Stunden auch als Maximalwert anzusehen, der nur in seltenen Fällen erreicht werden kann. Da im Zuge der später laufenden Benutzerstudie zu kleine Abstände während den verschiedenen Probanden kein Aufladen des Akkus ermöglicht, wurde diese Option bereits im Vorfeld ignoriert und die Kabelvariante vorgezogen. Auch auf eine kabellose Bildübertragung wird aufgrund einer Verzögerung verzichtet.

3.2. Funktionalität

Das Ziel ist es herauszufinden, inwiefern Fußinteraktionen auf einem Floor-Display mit einem Projektorhelm möglich sind. Das Floor-Display wird aktiviert, sobald der Helm-Träger in einem Winkel von unter 15 Grad auf den Boden schaut. Um den genauen Neigungswinkel zu erhalten, wird der Beschleunigungssensor der Kinect verwendet. Da wir nur herausfinden wollen, wie viele Interaktionszonen sinnvoll sind, wurden zwei unterschiedliche Funktionen implementiert.

Freier-Modus: Erkennung von Fuß-Interaktionen in aufgeteilten Gebieten.

Ziel-Modus: Kontrollfunktion für eine Fuß-Interaktion in einer fest definierter Zone.

Bei beiden Funktionen kann der Benutzer sich entscheiden, in wie viele Zonen die Projektionsfläche aufgeteilt werden soll.

Für die Aufteilung werden unterschiedliche transparente Hintergrundbilder zur Verfügung gestellt. Je nach verwandelter Aufteilung, wird ein anderes Hintergrundbild gesetzt. Der Prototyp unterstützt dabei folgende Aufteilungen:

- x = 1 , y = 1
- x = 2 , y = 1..4
- x = 3 , y = 1..4
- x = 4 , y = 1
- x = 5 , y = 1

Die Anzahl der Interaktionszonen ist in einer Konfigurationsdatei wählbar. Wenn eine ungültige Aufteilung der Zonen angegeben ist, wird ein entsprechender Warnbildschirm, statt den Interaktionszonen, eingeblendet.

⁶http://www.philips.de/c-p/PPX3610_EU/picopix-taschenprojektor

```
##### Configuration file for prototype #####
# xAreas = interaction areas in x direction 1..5 #
# yAreas = interaction areas in y direction 1..4 #
# leftDeathzone = pixels from left side to be ignored 0..240 #
# rightDeathzone = pixels from right side to be ignored 0..240 #
# upDeathZone = pixels from upper side to be ignored 0..320 #
# downDeathZone = pixels from down side to be ignored 0..320 #
# dMin = min size in mm of item/foot to detect #
# dMax = max size in mm of item/foot to detect #
# n = min. percentage of changed depth pixels in one area #
#####
xAreas=2
yAreas=2
leftDeathZone=160
rightDeathZone=195
upDeathZone=90
downDeathZone=240
dMin=25
dMax=40
n=25
width=640
height=480
```

Listing 3.1: Inhalte der Konfigurationsdatei für den Floor-Display-Prototyp.

Die Parameter: *xArea* und *yArea* entsprechen der Anzahl der Interaktionszonen in X- bzw. in Y-Richtung.

Es werden vier Parameter verwendet, um die Kalibrierung zwischen der Kinect und dem Beamer zu realisieren. Diese lauten: *leftDeathZone*, *rightDeathZone*, *upDeathZone* und *downDeathZone*. Eine Anpassung ist nötig, wenn die Position der Kinect oder des Beamers verändert wird, so dass eine erneute Kalibrierung vorgenommen werden muss.

Die Parameter: *dMin* und *dMax* geben an, welche Mindest- bzw. Maximalgröße ein Objekt haben muss, um als Fußinteraktion erkannt zu werden. *N* ist ein weiterer Parameter, der zur Erkennung von Fußinteraktionen benötigt wird.

Die letzten beiden Parameter *width* und *height* entsprechen der Größe des Tiefenframes der Kinect.

Im "Freien Modus" wird die erkannte Interaktion in der entsprechenden Zone angezeigt, indem diese farblich hervorgehoben wird. Im "Ziel Modus" wird die Zone, die als "Target-Zone" definiert wurde, farblich markiert. Je nachdem, ob der Benutzer die Zone trifft, oder nicht, wird ein anderes Feedback in Form einer Farbveränderung aufgezeigt. Interaktionen außerhalb der Projektionsfläche werden ignoriert, da hier keine Schnittmenge zwischen dem Beamer und der Kinect existiert.

3.3. Visualisierung

Jede Interaktionszone verfügt über einen weißen Hintergrund und einen dicken schwarzen Rahmen, um diese klar von den anderen unterscheidbar zu machen. Sobald der Nutzer seinen Kopf unter 15 Grad neigt, wird das Floor-Display aktiviert und die Erkennung gestartet. Je nach eingestellten X- und Y-Werten, wird eine unterschiedliche Anzahl an Interaktionszonen angezeigt. Im "Ziel Modus" ist die Fläche, mit der zu interagieren ist, türkis hervorgehoben. Wenn die richtige Interaktionszone getroffen wurde, verfärbt sich die gesamte Projektionsfläche grün, ansonsten rot (siehe Abbildung 3.5.). Im "Freien Modus" zeigt die Farbe Türkis normale "Treffer" an. Die Färbung findet solange statt, bis sich der Fuß nicht mehr innerhalb der Projektionsfläche befindet.



Abbildung 3.4.: Verfärbung der Interaktionszone bei erkannter Fuß-Interaktion.

3.4. Erkennung von Fußinteraktionen

Die Kinect liefert 30 Frames per second. Bei diesen Frames handelt es sich um sogenannte DepthImageFrames. Diese beinhalten insgesamt 307200 DepthImagePixel, was einer Auflösung von 640 x 480 entspricht. Jeder DepthImagePixel verfügt über die genauen Tiefeninformationen von diesem Pixel innerhalb des Frames. Die DepthImagePixel sind in einem eindimensionalen Array angeordnet.

Um möglichst geringe Systemanforderungen zu haben, wird der Tiefenframe nur jede 0,5 Sekunden (= alle 15 fps) analysiert. Die Analyse erfolgt nur, wenn der Blickwinkel korrekt ist, so dass eine bewusste Interaktion mit dem Floor-Display auch wirklich möglich ist. Den Algorithmus kann man in drei Schritte aufteilen. Diese werden im Folgenden genauer erklärt.

Schritt 1: Ignorieren nicht benötigter Informationen

Da die Projektionsfläche deutlich kleiner als der erfasste Bereich der Kinect ist, müssen die Bereiche, die nicht innerhalb der Schnittmenge liegen, entfernt bzw. ignoriert werden. Der Algorithmus macht dies, indem er durch sämtliche Tiefenpixel des Arrays iteriert und ihre X- und Y-Positionen untersucht, ob diese sich innerhalb der Projektionsfläche befinden. Wenn sich der Pixel außerhalb befindet, wird er ignoriert, ansonsten wird er weiter untersucht. Abbildung 3.5 stellt diesen Vorgang schematisch dar. Die graue Fläche entspricht dem Bereich, der von der Kinect erfasst wird. Das innere Rechteck, das aus drei gleichgroßen Teilen besteht, entspricht der Projektionsfläche. Die türkise Fläche kennzeichnet die aktuell eingestellte "Target-Zone".

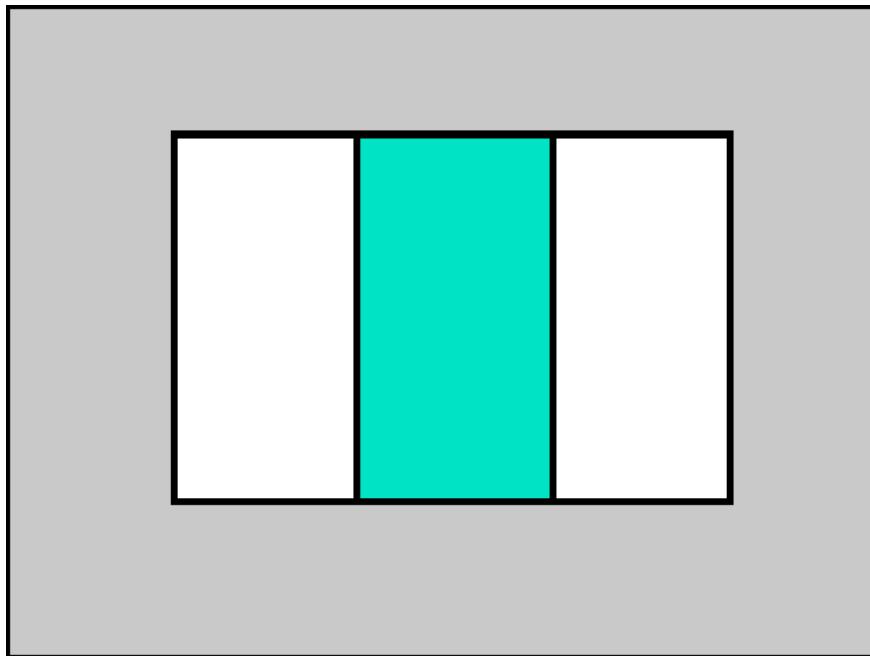


Abbildung 3.5.: Die von der Kinect erfasste Fläche mit der Projektionsfläche im Inneren.

3. Floor-Display-Prototyp

Schritt 2: Erstellung einer Bounding-Box

Nachdem sichergestellt ist, dass der Pixel sich innerhalb der Projektionsfläche befindet, wird der Tiefenwert zwischengespeichert und mit dem von links benachbarten Pixel verglichen. Der Algorithmus merkt sich bei jedem Pixel den Tiefenwert und vergleicht diesen. Falls der Unterschied zwischen den in der Konfigurationsdatei definierten Grenzen liegt, kann davon ausgegangen werden, dass ein Objekt sich innerhalb der Projektionsfläche befindet. Bei jedem Unterschied werden die X- und Y-Positionen des Pixels mit bisherigen gespeicherten Werten verglichen und falls sie kleiner/größer sind, als die gespeicherten Werte, als neue Grenzen gesetzt. Dadurch entsteht eine Bounding-Box, die das komplette Objekt abdeckt.

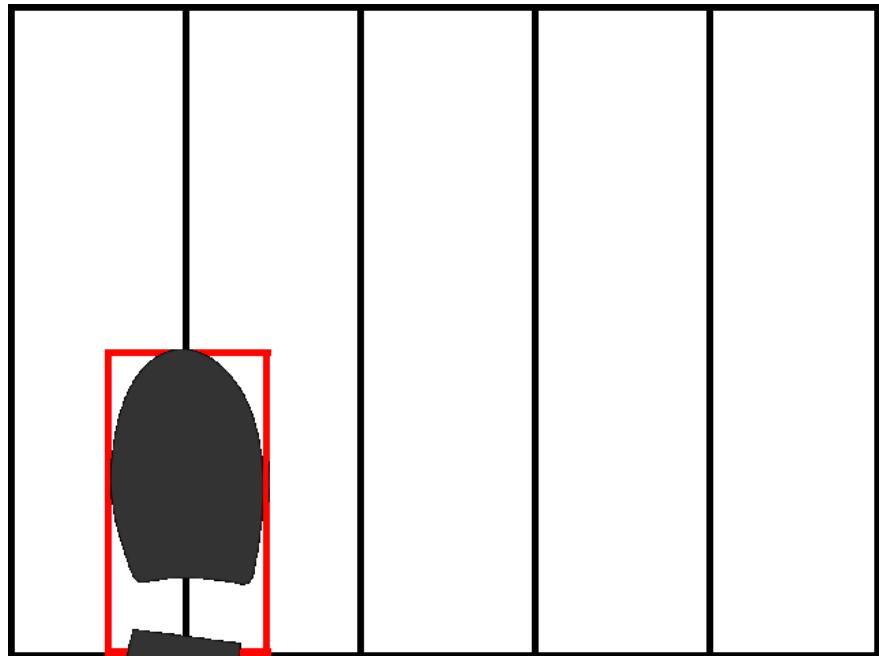


Abbildung 3.6.: Bounding-Box um einen Schuh bei fünf Interaktionszonen.

Schritt 3: Zuordnung der einzelnen Interaktionsbereiche

Nachdem die Bounding-Box erstellt wurde, muss diese einer der Interaktionszonen zugeordnet werden. Es folgt eine Wiederholung von Schritt 1. Anschließend wird untersucht, ob der jeweilige Pixel sich auch innerhalb der Bounding-Box befindet. Wenn ja, wird anhand der X- und Y-Positionen dieser einer der Interaktionszonen zugeordnet. Nachdem der Algorithmus durch alle Pixel iteriert ist, wird untersucht, welcher Zone die meisten Pixel zugeordnet wurden.

Der folgende Pseudocode erklärt den gesamten Algorithmus:

Algorithmus 3.1 Ablauf des Algorithmus zur Erstellung der Bounding-Box.

```
comparePixel = depth of first pixel in depthArray
boundingLeft = last pixel in x direction in beamer range
boundingRight = first pixel in x direction in beamer range
boundingUp = last pixel in y direction in depthArray
boundingDown = first pixel in y direction in depthArray
for all depthImagePixels in depthArray do
    if pixel is in beamer range then
        if min distance > (distance between pixel and comparePixel) < max distance then
            Take the x position of pixel
            Take the y position of pixel
            if x position > boundingLeft then
                boundingLeft = x Position
            end if
            if x position < boundingRight then
                boundingRight = x Position
            end if
            if y position > boundingUp then
                boundingUp = y Position
            end if
            if y position < boundingDown then
                boundingDown = y Position
            end if
            comparePixel = depth of current pixel
        end if
    end if
end for
if boundingbox size is big enough to be a foot then
    Start next pseudo code with bounding box as parameter
else
    print "false detection"
end if
```

3. Floor-Display-Prototyp

Algorithmus 3.2 Ablauf des Algorithmus zur Festlegung der Interaktionszone.

```
for all depthImagePixels in depthArray do
    if pixel is in beamer range then
        if pixel is in bounding box then
            Take the x position of pixel
            Take the y position of pixel
            for all zone in interactionZones do
                if x and y position is in zone then
                    zone = zone + 1
                end if
            end for
        end if
    end if
end for
interactionZone = 0
for all zone in interactionZones do
    if zone > interactionZone then
        interactionZone = zone
    end if
end for
set footZone = interactionZone
```

Dieses Kapitel hat die Interaktion mit dem zu entwickelten Projektorhelm vorgestellt. Mittels Fußinteraktionen innerhalb des projizierten Floor-Displays kann mit dem System kommuniziert werden. Da es noch nicht klar ist, wie viele Interaktionszonen für den Nutzer optimal sind, wird dies durch eine Benutzerstudie evaluiert, in der Probanden mittels dem implementierten Ziel-Modus die eingefärbten Flächen innerhalb der Projektion treffen müssen. Die Benutzerstudie wird im nächsten Kapitel genauer erklärt.



(a) Weiblicher Proband



(b) Männlicher Proband

Abbildung 3.7.: Probanden bei der Benutzung des Floor-Displays.

4. Evaluierung des Floor-Display-Prototyps

Um die optimale Anzahl an Interaktionszonen für den Floor-Display-Prototyp zu evaluieren, wurde eine Benutzerstudie entworfen. In dieser Studie wurde die Performance der Probanden gemessen, um Auskunft darüber zu erlangen, was eine sinnvolle Anzahl an Interaktionszonen ist, um Fehleingaben zu vermeiden.

Zuerst wird das Studiendesign genauer erklärt, welche Aufgaben die Probanden zu erledigen hatten und was für Messungen dabei vorgenommen wurden. Es folgt anschließend ein Überblick über die Teilnehmer. Danach wird der genaue Ablauf eines Durchlaufs beschrieben. Das Kapitel wird mit den Resultaten und Einschränkungen der Benutzerstudie abgeschlossen.

4.1. Design

Wir haben für diese Studie ein Repeated-Measure-Design [VC96] benutzt, damit die Reihenfolge der zu absolvierenden Aufgaben keinen Einfluss auf das Endresultat hat. Jeder Proband musste eine spezifische Aufgabe 35 Mal erledigen, mit acht verschiedenen Conditions. Um auszuschließen, dass sich ein Lerneffekt oder andere Effekte durch die Reihenfolge entwickeln können, wurde ein Balanced Latin Square [Bai08] in der Höhe 4 verwendet. Dadurch wurde gewährleistet, dass vier aufeinanderfolgende Teilnehmer eine unterschiedliche Aufgabenreihenfolge hatten. Das verwendete Muster ist in der Tabelle 4.1 zu sehen. Als unabhängige Variable haben wir die Menge der Interaktionszonen in X- und Y-Richtung benutzt.

Proband	Aufgabenreihenfolge mit X Y							
A	1 2	1 3	1 4	1 5	2 2	2 3	2 4	2 5
B	1 3	1 4	1 5	1 2	2 3	2 4	2 5	2 2
C	1 4	1 5	1 2	1 3	2 4	2 5	2 2	2 3
D	1 5	1 2	1 3	1 4	2 5	2 2	2 3	2 4

Tabelle 4.1.: Balanced Latin Square für die Floor-Display-Benutzerstudie.

Dieses machte aus jeweils vier Teilnehmern eine Gruppe. Das Ziel dieser Studie war es, sowohl objektives, als auch subjektives Feedback über die unterschiedliche Anzahl von Interaktionszonen zu erhalten.

4. Evaluierung des Floor-Display-Prototyps

Abhängige Variablen

Als abhängige Variablen wurde die benötigte Zeit, die gemachten Fehler und der NASA-TLX Score gemessen.

Die Fehleranzahl wurde für sämtliche Durchgänge separat gezählt und nach den Interaktionszonen gruppiert. Die Fehleranzahl wurde über einen Logger innerhalb des Prototyps aufgenommen und die Ergebnisse in das Programmverzeichnis exportiert. Dabei wurden für jeden Teilnehmer zwei Dateien erstellt. Eine *.txt-Datei, die für Menschen gut lesbare Inhalte beinhaltet und eine *.csv-Datei, die für eine Weiterverarbeitung in anderen Programmen zu Auswertungszwecken erstellt wurde.

Es wird neben dem eigentlichen Fehler auch protokolliert, welche Interaktionszone die Target-Zone war und in welchem die Interaktion erkannt wurde, um dadurch Aufschluss über die Ursache des Fehlers bieten zu können.

Nach jeder Condition musste der Nutzer am Computer einen Fragenkatalog beantworten.

Als Fragenkatalog wurde der NASA-Task Load Index (NASA-TLX) [Har06] benutzt. Eine Abbildung des vollständig benutzten Fragenkatalogs befindet sich im Anhang.

Der NASA-TLX beinhaltet Fragen über:

- **Geistiger Anspruch:** beschreibt wie sehr sich der Proband mental anstrengen musste, um seine Aufgabe zu erledigen.
- **Physischer Anspruch:** beschreibt, wie sehr sich der Proband körperlich anstrengen musste, um seine Aufgabe zu erledigen.
- **Zeitlicher Anspruch:** beschreibt, wie sehr der Proband das Gefühl hatte, unter einem (selbst aufgelegten) Zeitdruck zu stehen.
- **Performance:** beschreibt, wie sehr der Proband das Gefühl hatte, seine Aufgabe erfolgreich abgeschlossen zu haben.
- **Aufwand:** beschreibt wie groß der Aufwand empfunden wurde, um die gestellte Aufgabe zu erledigen.
- **Frustration:** beschreibt wie sehr und wie oft der Proband sich frustriert gefühlt hat.

Die Fragen beziehen sich jeweils nur auf die aktuelle Aufgabe und wurden über eine Intervallskala, die von 0 (= sehr niedrig) bis 20 (= sehr hoch) geht, beantwortet.

Jeder Proband wurde zudem am Ende der Benutzerstudie darum gebeten, seine erlebte Erfahrung und Gefühle mittels mehrerer Schlagworte zu beschreiben.

4.2. Teilnehmer

Es haben insgesamt 16 Teilnehmer teilgenommen, darunter dreizehn Männer und drei Frauen. Da neben dem Alter auch die Schuhgröße und Körpergröße sehr wichtig war, werden diese Information ebenfalls angegeben. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 25 Jahre, mit der Standardabweichung 3,9. Der durchschnittliche Proband war 1,74 Meter groß und hatte eine Schuhgröße von 42,3. Die Teilnehmer waren zwischen 18 und 35 Jahre alt.
Es gab elf Studenten, zwei Mitarbeiter vom VIS Institut und drei der Probanden haben außerhalb der Universität Stuttgart gearbeitet. Einer der männlichen Teilnehmer war zudem farbenblind.

4.3. Ablauf

Zu Beginn der Studie bekamen alle Probanden zuerst eine kurze Zusammenfassung über die Diplomarbeit. Anschließend wurde ihnen erklärt, wie die Benutzerstudie genau ablaufen wird und was für Aufgaben sie zu verrichten haben. Anschließend wurde ihnen gezeigt, wie sie den Helm zu tragen haben, wie man mit dem Floor-Display interagieren kann und welche Farbe welches Feedback bedeutet. Anschließend musste jeder eine Einverständniserklärung unterschreiben, welche in deutscher und englischer Sprache angeboten wurde.

Nachdem die Einverständniserklärung abgegeben wurde, durften die Probanden erst einmal einen Probelauf machen, damit sie in der Lage sind im erforderlichen Winkel auf den Boden zu schauen, um mit dem Fuß in die Projektionsfläche zu gelangen.

Sobald der Proband angegeben hat, dass er bereit ist, wurde mit der ersten Condition gestartet. Nach jeder erkannten Interaktion innerhalb einer Interaktionszone, musste der Fuß unabhängig vom Feedback die Projektionsfläche kurzzeitig verlassen, damit die nächste Target-Zone markiert werden konnte.

Nach jeweils 35 Treffern, musste der NASA-TLX am Computer ausgefüllt werden. Hierbei wurde die Möglichkeit angeboten, bei auftauchenden Fragen, Hilfestellung zu erhalten.

Nach insgesamt acht Runden und 280 Fußinteraktionen, durfte der Helm abgesetzt werden. Zum Abschluss wurden noch Fragen zu folgenden Basis-Angaben gestellt: Alter, Studiengang/Beruf, Schuhgröße, Körpergröße und bisherige Erfahrungen.

Anschließend wurde jeder Teilnehmer darum gebeten, seine gemachte Erfahrung ehrlich in wenigen Wörtern zu beschreiben. Die Probanden durften als Belohnung sich Süßigkeiten aussuchen.

4. Evaluierung des Floor-Display-Prototyps

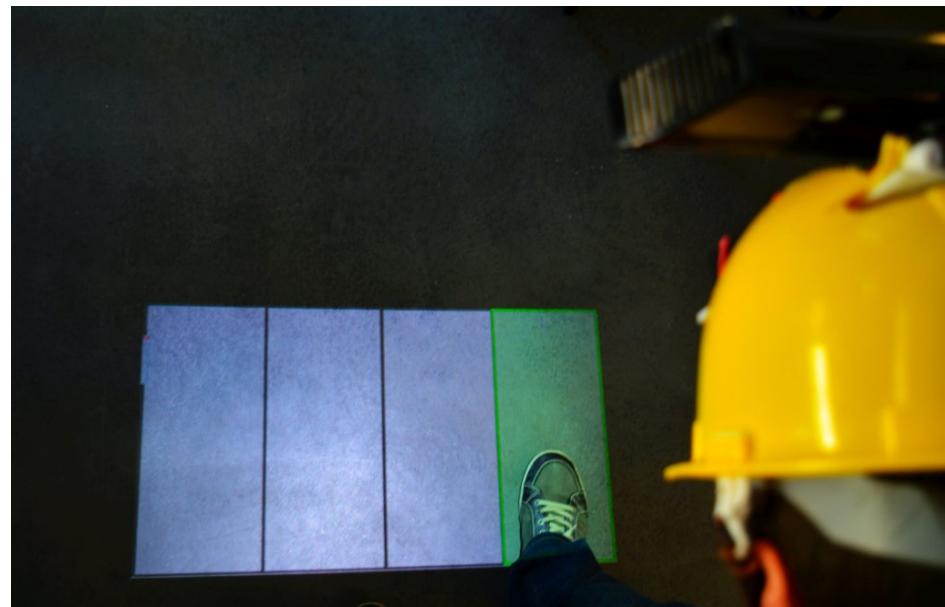


Abbildung 4.1.: Erkannte Fuß-Interaktion während der Benutzerstudie.

4.4. Resultate

Während der Benutzerstudie wurden objektive Ergebnisse gesammelt, welche im Folgenden dargestellt werden. Sämtliche präsentierte Daten beziehen sich auf die kompletten 4480 erkannten Fuß-Interaktionen während der Benutzerstudie durch die 16 Probanden.

Es wurden während der Studie drei unterschiedliche Messgrößen gesammelt, die benötigte Zeit, die gemachten Fehler und der NASA-TLX Score (siehe Untersektion Abhängige Variablen). Die Analyse der Ergebnisse bzw. der Inhalte der erzeugten CSV-Dateien erfolgte durch das IBM SPSS Statistics¹ Softwareprodukt.

Es wird mit der Analyse der Zeit begonnen.

¹<http://www-01.ibm.com/software/de/analytics/spss/products/statistics/products.html>

Zeit-Resultate

Ausgehend von der kleinsten Anzahl an Interaktionszonen ist festzustellen, dass die benötigte Zeit mit einer Erhöhung der Zonen in X-Richtung wächst. Eine Erhöhung der Anzahl der Interaktionszonen in Y-Richtung hat hingegen kaum bzw. keine Erhöhung der Zeit zur Folge gehabt. Angefangen bei einem Mittelwert von 84,842 Sekunden bei zwei Interaktionszonen in X-Richtung und einer in Y-Richtung, einer Standardabweichung von 17,006 und einem Standardfehler von 4,251, haben fünf Interaktionszonen in X-Richtung bereits die Ergebnisse: M= 108,218, SD = 21,817 und SE = 5,454 gehabt. In der Abbildung 4.2. befindet sich ein paarweiser Vergleich der Interaktionszonen, mit den Konstanten Y = 1 und Y = 2 und der veränderlichen Variable X. Bei dem Vergleich sind keine signifikanten Unterschiede ersichtlich geworden, $F(7,120) = 2,501$, $p = \text{n.s.}$

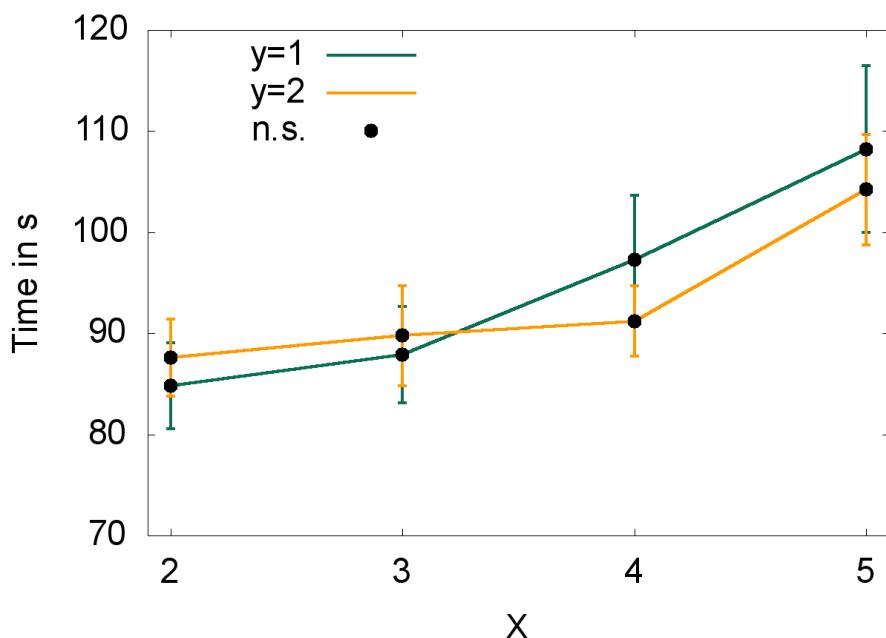


Abbildung 4.2.: Paarweiser Vergleich bzgl. der Zeit mit Y = 1 und Y = 2.

TLX-Resultate

Anders als bei den Ergebnissen der Zeitmessung, ist mit Erhöhung der Komplexität hier ein stets steigender Wert des NASA-TLX Score zu erkennen, angefangen bei $M = 22,69$, $SD = 16,604$ und $SE = 4,151$ für (2,1) bis hin zu $M = 52,94$, $SD = 20,619$ und $SE = 20,619$. Der Standardfehler und die Standardabweichung steigen im Vergleich zur Durchschnittszeit nicht stetig, jedoch ist ein klarer Unterschied in Hinsicht der Anzahl der Interaktionszonen in Y-Richtung zu erkennen. Während der durchschnittliche Mittelwert bei den Interaktionszonen mit $Y = 1$ noch 25,72 betragen hat, liegt dieser bei $Y = 2$ bei 45,54. Ein paarweiser Vergleich zeigt zudem, dass es bei $X = 3$ und $X = 5$ einen signifikanten Unterschied gibt, $F(7,120) = 6,016$, $p < 0.001$.

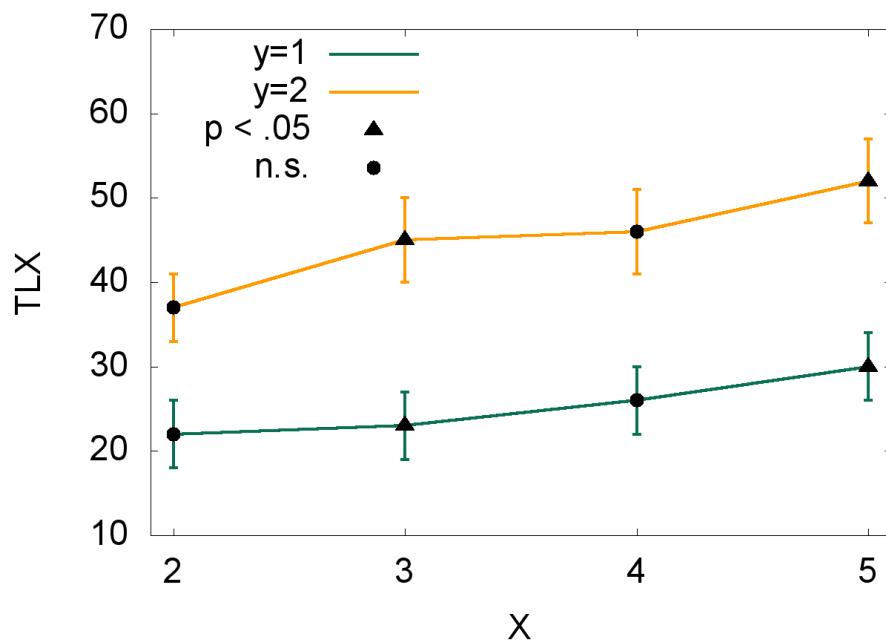


Abbildung 4.3.: Paarweiser Vergleich bzgl. des TLX-Wertes für die Ergebnisse mit $Y = 1$ und $Y = 2$.

Fehler-Resultate

Auch bei den Fehlern lässt sich eine Steigung gut erkennen. Während bei $Y = 1$ und $X = 1$ sowie 2 die Werte fast identisch niedrig waren ($M = 0,31 / 0,38$, $SD = 0,704 / 0,719$ und $SE = 0,176 / 0,754$), sind bei vier Interaktionszonen in X-Richtung (4,1) die Werte bereits sehr stark angestiegen, $M = 2.19$, $SD = 3,016$ und $SE = 0,754$. Bei $X = 5$ haben sich die Werte noch einmal verdoppelt. Beim Hinzufügen einer weiteren Interaktionszone in Y-Richtung und $X = 2$ hat sich die durchschnittliche Fehlerzahl im Vergleich zu (5,1) ein weiteres Mal verdoppelt. Bei der maximalen Anzahl an Interaktionszonen mit fünf Zonen in X-Richtung und zwei in Y-Richtung, liegt die durchschnittliche Fehlerrate sogar bei 15, die Standardabweichung bei 5,305 und der Standardfehler bei 1,326. Auch hier wurde ein paarweiser Vergleich betrachtet, der zeigt, dass sämtliche Paare einen signifikanten Unterschied aufweisen, $F(7,120) = 27,700$, $p < 0,001$.

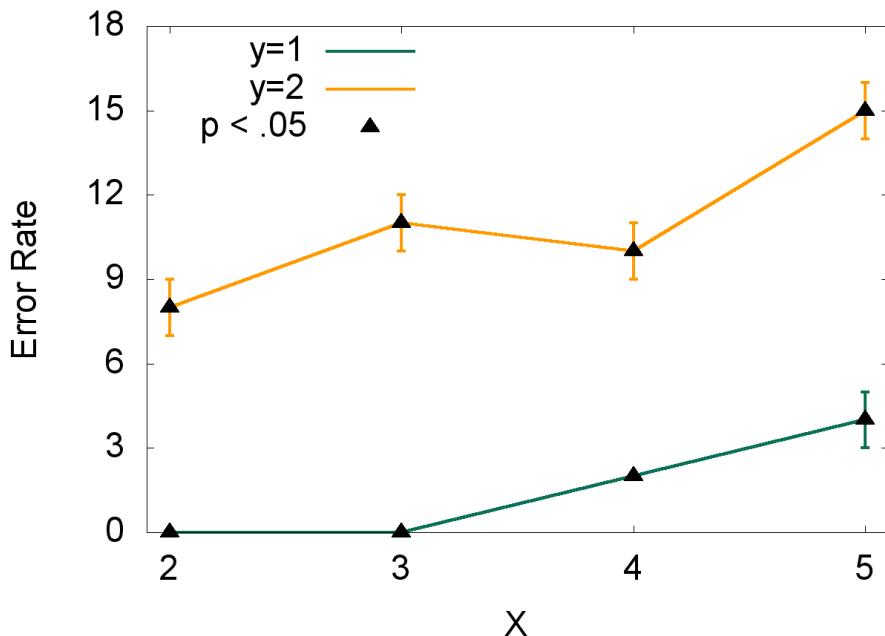


Abbildung 4.4.: Paarweiser Vergleich bzgl. der Fehlerzahl für die Ergebnisse mit $Y = 1$ und $Y = 2$.

4.5. Diskussion

Die Ergebnisse dieser Benutzerstudie haben gezeigt, dass sowohl die Nutzer, als auch das System mit $Y = 2$ (oder höher) überfordert sind.

Aber auch mit einer einzigen Reihe gab es bereits bei mehreren Probanden Probleme. Während einige die ersten vier Conditions mit $Y = 1$ im Schnitt mit weniger als einem Fehler abgeschlossen haben, haben sich andere hier bereits sehr schwer getan.

Einer der häufigsten Ursachen für eine False-Detection war das Standbein, da dieses bei fast allen Teilnehmern mindestens einen Fehler verursacht hat.

Der zweithäufigste Fehler, der insbesondere bei $Y = 1$ auftrat, war ein "Vorhersehen". Viele Nutzer meinten mehrmals die Position der nächsten Target-Zone im Vorfeld zu wissen und haben ihren Fuß zu schnell auf ein falsches Feld gesetzt. Die Positionsreihenfolge der Target-Zones wurde zwar nicht durch einen Zufallsgenerator erstellt, da wir die gleichen Positionen und deren Reihenfolge bei allen Benutzern identisch haben wollten. Es wurde jedoch eine feste Reihenfolge benutzt, die man nicht erraten konnte, da sie bei jeder Condition vollständig anders war.

Der dritthäufigste Fehler, der nur bei $Y = 2$ aufgetreten ist, war ein False-Detection, der abhängig von der getragenen Hose dazu geführt hat, dass innerhalb der ersten Reihe bereits eine Interaktion registriert wurde, bevor der Fuß seine Endposition erreicht hat.

Bei den Resultaten kamen keine Zusammenhänge zwischen den Leistungen und der Schuh- und/oder Körpergröße heraus. Vielmehr haben die Beweglichkeit, die Kondition sowie die Motivation eine sehr große Rolle gespielt.

4. Evaluierung des Floor-Display-Prototyps

Einer der Probanden hat die Benutzerstudie mit wenig Motivation durchgeführt, weshalb seine Ergebnisse bereits bei $X = 2$ und $Y = 1$ deutlich schlechter waren, als der Durchschnitt. Um die Glaubwürdigkeit der Benutzerstudie beizubehalten, wurde seine Teilnahme dennoch gewertet.

Beim subjektiven Feedback waren die häufigsten Schlagwörter:
Schmerz, Gewicht, Unangenehm, Hitze.

Diese Schlagwörter sind aufgrund des Gewichts vom Projektorhelm und des unangenehmen Winkels entstanden. Über 50 Prozent der Probanden gaben außerdem von sich aus noch an, dass sie die grundsätzliche Idee eines projizierten Floor-Displays dennoch sehr positiv empfinden, wenn der Blickwinkel Richtung Boden reduziert werden kann, damit die empfundene Belastung sinkt.

4.6. Einschränkungen

Sowohl der Prototyp, als auch der Projektorhelm an sich hatten einige Einschränkungen, die zur Beeinflussung der erzielten Messungen geführt haben.

Diese Einschränkungen bieten einen guten Einstieg für zukünftige Verbesserungen. Es wird mit den Einschränkungen des Projektorhelms begonnen.

Bei der Studie hat man erkennen können, dass der Blickwinkel zum Boden äußerst niedrig sein musste. Abbildung 4.1 zeigt, wie sehr die Probanden nach unten schauen mussten. Einige Probanden hatten damit Probleme und erhielten nach kurzer Zeit Nackenschmerzen.

Wenn der Neigungswinkel zu stark gesunken ist, war zudem das Standbein im Weg, so dass der Winkel zwischen zwei Bereichen konstant liegen musste, was aufgrund der Nackenschmerzen, bei einigen Probanden nur schwer möglich war.

Die andere Einschränkung betrifft den verwendeten Algorithmus. Je nach Kleidung wurden False-Detections registriert. Interaktionen, die bereits vor der Endpositionierung des Fußes registriert wurden, sorgten für etwa 30 Prozent der Fehler bei $Y = 2$. Auswirkungen auf $Y = 1$ hatte dies nicht.

5. Kommissionierungs-Prototyp

Nachdem bereits in Kapitel 3 auf die Interaktion mit dem System, durch ein Floor-Display, eingegangen wurde, konzentriert sich dieses Kapitel nun auf den eigentlichen Anwendungsfall. Es soll mit dem Projektorhelm möglich sein, diesen an Stelle eines Head-Mounted-Displays zu tragen, um die Pick-by-Vision Methode als Unterstützung bei der Kommissionierung zu verwenden. Aus diesem Grund wurde der existierende Prototyp dahingehend erweitert, den Nutzer zu Entnahme- und Ablageorte eines Auftrags zu führen, damit die Kommissionierung mithilfe des Projektorhelms durchgeführt werden kann.

Dieses Kapitel beschreibt zuerst, wie sich der Aufbau des Projektorhelms im Vergleich zum vorherigen Aufbau-Unterkapitel von Kapitel 3 verändert hat. Anschließend wird auf die Funktionalitäten eingegangen, die neu hinzugekommen sind. Schließlich wird auf die verwendete Visualisierung eingegangen und das aufgebaute Netzwerk beschrieben. Das Kapitel wird durch die Erklärung des implementierten Algorithmus beendet.

5.1. Aufbau

Beim Aufbau des Projektorhelms hat sich wenig verändert. Durch das Feedback der vorangegangenen Benutzerstudie wurde der Winkel der eingespannten Plastikplatte um wenige Grad gesenkt. Der einzige sichtbare Unterschied ist auf der Oberseite der verwendeten Microsoft Kinect zu erkennen. An dieser wurde ein Rigid Body befestigt. Bei Rigid Bodies handelt es sich um Plastikkonstrukte, an denen mehrere Marker befestigt werden können. Diese werden von der Software *Motive*¹ erkannt. Hierbei handelt es sich um eine Motion Capture Software, die die Software-Komponente des Optitrack-Systems² darstellt. Motive verwaltet die zum Optitrack-System dazugehörige Optitrack-Hubs an denen Infrarot-Kameras angeschlossen sind. An jedem Rigid Body können bis zu sieben Marker angebracht werden. Es müssen mindestens drei Marker erkannt werden, um einen Rigid Body eindeutig identifizieren zu können.

5.2. Funktionalität

Die Funktionen, die der Prototyp anbieten muss, um eine Hilfe bei der Kommissionierung darzustellen, kann man in die drei Unterpunkte: Auftragsverwaltung, Zielführung und Pick-Detection aufteilen. Jeder Unterpunkt wird im Folgenden etwas genauer beschrieben.

¹<http://www.optitrack.com/products/motive/>

²<http://www.optitrack.com>

5. Kommissionierungs-Prototyp



Abbildung 5.1.: Ausschnitt des Projektorhelms mit dem Fokus auf den Rigid Body.

Auftragsverwaltung

Der Prototyp kann mehrere Aufträge zeitgleich verwalten. Beim Start der Software wird eine XML-Datei eingelesen, die die existierenden Aufträge beinhaltet. Jedes Attribut innerhalb eines Auftrags muss angegeben sein. Die eindeutige Identifizierung eines Auftrags geschieht zur Laufzeit des Prototyps, mittels einer eindeutigen ID, die nach der Reihenfolge ihres Einlesens innerhalb der XML-Datei vergeben wird. Das Gleiche gilt für die Aufgaben innerhalb eines Auftrags, die ebenfalls im jeweiligen Auftrag eine eindeutige ID erhalten.

Die enthaltenen Attribute innerhalb der XML-Datei werden im Folgenden beschrieben.

- **name:** Jeder Auftrag erhält eine frei wählbare Bezeichnung, um auch eine für den Nutzer, unterscheidbare Darstellung zu ermöglichen.
- **startRack:** Dies bezeichnet ein Regal, das als zentraler Entnahmestandort dient.
- **targetRack:** Dies bezeichnet ein Regal, das als zentraler Ablageort dient.
- **startShelf:** Das Regalfach, das als genauer Entnahmestandort dient.
- **targetShelf:** Das Regalfach, das als genauer Ablageort dient.

Jeder Auftrag enthält genau einen Namen, jeweils einen zentralen Entnahmestandort und Ablageort sowie ein Aufgaben-Element (<Tasks>), welches mindestens über eine Aufgabe verfügt. Jede Aufgabe muss jeweils einen genauen Entnahmestandort und Ablageort haben sowie eine Menge, die größer als 0 ist. Während der Name ein String sein muss, müssen sämtliche anderen Attribute mit Integer-Werten versehen werden. Der zentrale Entnahmestandort und Ablageort darf identisch sein, falls Gegenstände von

einer Position zu einer anderen Position innerhalb eines zentralen Regals verschoben werden müssen.

```
<orders>
  <order>
    <name> Order Example One </name>
    <startRack>1</startRack>
    <targetRack>2</targetRack>
    <tasks>
      <task>
        <startShelf>9</startShelf>
        <targetShelf>1</targetShelf>
        <items>2</items>
      </task>
      ...
    </tasks>
  </order>
</orders>
...
```

Listing 5.1: Auszug eines Beispieldaufrags.

Zielführung

Durch die Auftragsverwaltung weiß der Projektorhelm, welche Positionen innerhalb eines Auftrags benötigt werden. Da die Auftragsverwaltungs-Komponente keine festen Positionen vorsieht, sondern lediglich eine Zuordnung ermöglicht, müssen die Positionen fest kodiert werden. Wir haben dies für Demonstrationszwecke so gelöst, dass drei Regale nebeneinander standen und dadurch als ein einzelnes zentrales großes Regal mit vielen Regalfächern definiert wurden. Die Koordinaten für das erste Regalfach wurden für unser 3D-Model im Prototyp hinterlegt. Ebenso die genauen Abstände in X-, Y- und Z-Richtung zu den benachbarten Regalfächern. Da alle Regalfächer über gleiche Abstände verfügen, wurde eine fortlaufende Nummer verwendet, so dass die Koordinaten für unser 3D-Model, durch die Distanz der Regalfächer vom Ursprung, bestimmt werden konnten.

Das gleiche Prinzip wird beim Ablageort angewandt. Je nach aktiver Aufgabe innerhalb eines Auftrags, verfügt man dadurch über zwei Positionen innerhalb des 3D-Models: die aktuelle Position des Helms sowie die Position des Regalfachs. Durch die Verwendung einer Pfeil-Notation wird der Helmträger mittels Befolgung von Richtungs-Pfeilen vor das richtige Regal geführt. Je nach Höhe des Regalfachs bekommt der Nutzer die Anweisung in die Knie zu gehen, bzw. aufzustehen. Dies wird durch Höhen- bzw. Tiefen-Pfeile dargestellt. Wenn er vor dem richtigen Regalfach steht, bzw. in das richtige Regalfach schaut, verfärbt sich der Bildschirm. Nach erfolgreicher Entnahme werden Rotations-Pfeile angezeigt, die die Richtung zum Ablageort zeigen. Sobald der Nutzer in die korrekte Richtung schaut, werden die Richtungs-Pfeile eingebettet und die Projektionsfläche bei korrekter Position eingefärbt.

5. Kommissionierungs-Prototyp

Streaming der Position

Neben der Verwaltung der Kameras, ist Motive für die Ausgabe der Position in einem 3D-Model für die Rigid Bodies verantwortlich. Die Position des auf dem Projektorhelm befestigten Rigid Body wird innerhalb der Software Motive erkannt und verfolgt. Motive bietet von Haus aus die Möglichkeit an, über ein Multicast-Stream an die Positionsdaten im 3D-Model zu gelangen. Wir haben hierfür eine Bibliothek zur Verfügung gestellt bekommen, die sich über das Netzwerk mit Motive verbunden hat und die Positionsdaten unserer Software zur Verfügung gestellt hat. Um einen stetigen Zugriff der Daten zu gewährleisten, wurde das Abfragen der Positionsdaten in einen eigenen Thread verlegt, der alle 0,5 Sekunden die genaue Position des Projektorhelms abgefragt hat. Die Positionsabfrage wird mit dem Starten eines Auftrags begonnen und mit der Erledigung der letzten Aufgabe des aktiven Auftrags beendet.

Picking-Detection

Um eine schnelle Erkennung zu gewährleisten, wurde der "Wizard of Oz"-Ansatz benutzt. Andernfalls wäre es nicht möglich gewesen, verwertbare Resultate bei der folgenden Benutzerstudie zu erhalten. Die Erkennung funktioniert sonst gleichwertig, wie ein effizienter Algorithmus und Probleme, wie eine versehentliche Verschiebung der Tiefenkamera, sind ausgeschlossen. Bei einer erkannten Interaktion, wird durch eine Tastatur-Taste bzw. Taste eines Pointers dem System mitgeteilt, dass die Projektionsfläche betreten wurde.

Um eine Interaktion zu erkennen, muss diese innerhalb der Projektionsfläche stattfinden. Wenn der Projektor nicht auf die zu entnehmenden Gegenstände leuchtet, ist kein Erkennen einer Interaktion möglich.

Sobald die in die Projektionsfläche hinein greifende Hand die Fläche verlassen hat, wird dies dem System auf dem gleichen Weg mitgeteilt. Dadurch ist gewährleistet, dass die Pick-Detection nur vom Faktor Mensch abhängig ist und keine sonstige Beeinflussungen haben kann.

5.3. Visualisierung

Anders als beim Floor-Display, bei dem die Visualisierung zwar wichtig war, jedoch im Funktionsumfang kleiner, gewinnt sie bei diesem Prototypen an Bedeutung. Da der Projektorhelm bei der Zielführung nichts anderes machen kann, als dem Nutzer Anweisungen zu geben, müssen diese möglichst exakt sein, damit der Benutzer ohne große Probleme diesen folgen kann. Da wir an den Beamer nur Bild-Informationen übertragen, haben wir uns auf visuelles Feedback beschränkt. Je nach Position des Nutzers werden unterschiedliche Pfeile dargestellt.

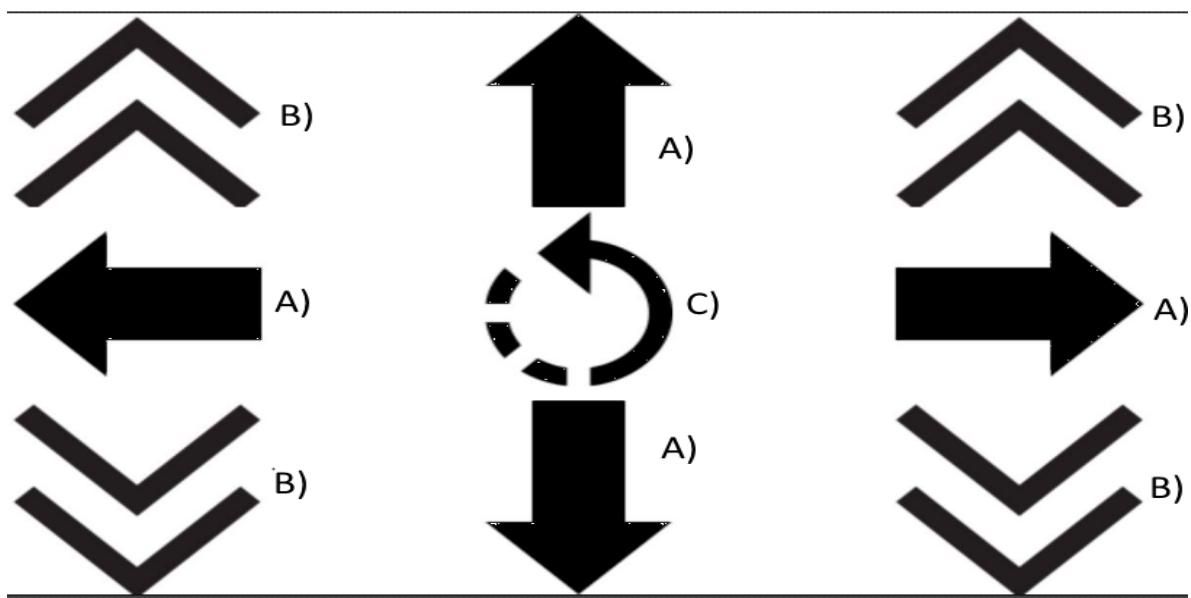


Abbildung 5.2.: Verwendete Richtungs-, Rotations- und Höhen-/Tiefen-Pfeile.

Abbildung 5.2 zeigt (fast) alle möglichen Pfeile, die das System verwendet. Die vier Richtungspfeile bei A (Links, Rechts, Oben, Unten) geben die Richtung an, in die sich der Projektorhelm-Träger fortbewegen muss. Die Pfeilpaare B geben die Höhe bzw. Tiefe des Regalfachs an. Der Pfeil bei C zeigt die Richtung an, in die sich der Träger des Helms drehen muss, um auf den korrekten Ablage bzw. Entnahmestandort zu schauen. Je nach Orientierung kann sich dieser auch ändern. Da dies ein äquivalenter Fall wäre, wurde auf die Darstellung verzichtet. Das System gibt nicht die Blickrichtung zu einem spezifischen Regalfach an, sondern dient nur dazu, dass die Blickrichtung zum zentralen Entnahmestandort zeigt. Die Rotations-Pfeile sind insbesondere bei mehreren zentralen Ablage- und Entnahmestandorten innerhalb eines Raumes notwendig.

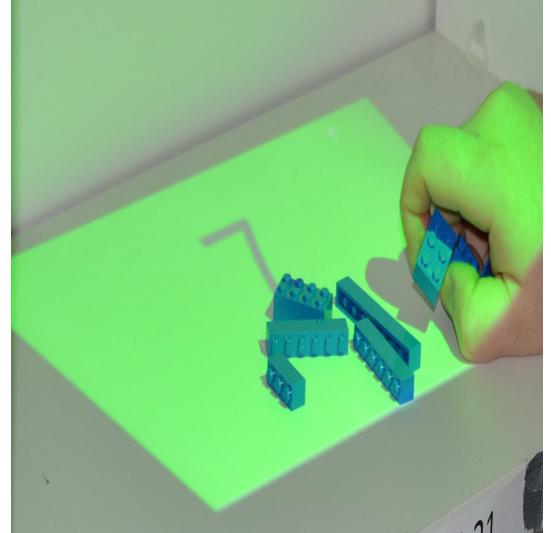
Sobald der Helmträger vor dem korrekten Regalfach steht, wird die Projektionsfläche gelb eingefärbt und die Anzahl der zu entnehmenden Gegenstände als Zahl mittig dargestellt. Bei erkannter Interaktion verfärbt sich die Fläche grün. Beide Situationen sind in der Abbildung 5.3 dargestellt. Sobald keine Interaktion mehr innerhalb der Projektionsfläche erkannt wird, wird ein Rotations-Pfeil angezeigt, anschließend geht es mit der Führung zum nächsten, im Auftrag definierten, Ort weiter.

5. Kommissionierungs-Prototyp

Bei Absolvierung aller Aufgaben des momentan ausgewählten Auftrags, wird die Projektionsfläche blau und ein Symbol erscheint, das die Beendigung des Auftrags anzeigen.



(a) Korrekter Entnahmehort mit der Darstellung der Anzahl, der zu entnehmenden Gegenständen.



(b) Erkannte Interaktion innerhalb des Entnahmehorts.

Abbildung 5.3.: Ein Benutzer beim Interagieren mit dem System.

5.4. Netzwerk

Um sicherzustellen, dass es zu keinen Problemen von außerhalb kommen kann, wurde ein eigenes Netzwerk aufgestellt, in welchem sich nur zwei Computer befunden haben. Das Netzwerk wurde über ein Passwort gesichert. In dem Netzwerk haben sich ein Desktop-PC (über Kabel) und ein Notebook (über WLAN) befunden. Der Beamer und die Kinect waren mit dem Notebook über USB verbunden, da auf diesem auch der Prototyp lief.

Der Desktop-PC war mit vier Optitrack-Hubs verbunden, an denen jeweils bis zu sechs Optitrack-Kameras angeschlossen waren. Insgesamt wurden 16 Kameras verwendet. Durch die Software erfolgte die Kommunikation mit den Kameras. Über die zur Verfügung gestellte Bibliothek haben wir die Position des Helms über das Netzwerk erhalten.

5.5. Algorithmus

Wir haben, wie auch bereits bei der Implementierung für das Floor-Display, einen Teil des Sourcecodes verwendet, der für die Kinect-Ansteuerung konzipiert wurde. Dadurch können wir alle 0,5 Sekunden ein Event auslösen. Anstatt ein Tiefenframe anzufordern, wird die Position des Helms betrachtet und diese mit der Position des Zielortes verglichen.

Basierend auf dem 0,5 Sekunden-Intervall wird die Postion stetig kontrolliert und Richtungs-Pfeile eingeblendet. Wenn der Nutzer am richtigen Zielort (= Position des Entnahmefachs von der aktuellen Aufgabe des aktiven Auftrags) angekommen ist, wird die Projektionsfläche alle 0,5 Sekunden auf Interaktionen überprüft.

Um zu wissen, ob der Projektorhelm bzw. der Helm-Träger am richtigen Zielort angekommen ist, betrachtet unser Algorithmus einen Point3D und kontrolliert, ob dieser sich innerhalb eines definierten Gebiets befindet, welches abhängig von den Koordinaten im Raum ist. Da wir die Blickrichtung bei der Positionsartung ignorieren, bzw. voraussetzen, dass dieser geradeaus geht, können wir auf diese Weise einfach überprüfen, ob sich der Projektorhelm innerhalb des Gebiets befindet.

Bei erfolgter Interaktion, die durch den "Wizard of Oz"-Ansatz registriert wird, verfärbt sich die Fläche. Im gleichen Intervall wird solange überprüft, ob eine Interaktion derzeit noch vorhanden ist, bis das Programm meldet, dass die erkannte Interaktion nicht mehr registriert wird. Dies wird als erfolgreiche Entnahme gewertet. Unser Algorithmus kann nicht erkennen, ob der Nutzer tatsächlich Gegenstände entnommen hat. Wir gehen davon aus, dass dies so geschehen ist und die Anzahl an Gegenständen korrekt ist.

Anschließend wird der Nutzer zum jeweiligen Ablageort navigiert und das System erkennt Interaktionen, die innerhalb der Projektionsfläche stattfinden. Nachdem ein Ablegen registriert wurde, wird innerhalb des aktiven Auftrags abgefragt, ob eine nächste Aufgabe vorhanden ist. Wenn ja, wird mit der nächsten Aufgabe fortgefahrene. Andernfalls verfärbt sich die Projektionsfläche blau und es werden keine weiteren Positionen des Projektorhelms abgefragt.

Dieses Kapitel hat den eigentlichen Anwendungsfall des Projektorhelms vorgestellt. Durch projizierte Richtungspfeile wird der Träger des Projektorhelms zu den, im Auftrag festgelegten, Entnahm- und Ablageorten geführt. Das System erkennt die Interaktionen mit dem Nutzer und gibt dies durch farbiges Feedback wieder. Um zu sehen, wie der Projektorhelm gegenüber der Pick-by-Paper Methode abschneidet, wird eine Benutzerstudie durchgeführt, die im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben wird.

6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps

Um herauszufinden, wie die Resultate bezüglich der benötigten Zeit und gemachten Fehler, ausfallen, wurde eine ausführliche Benutzerstudie entworfen, in welcher der Projektorhelm mit der Pick-by-Paper Methode verglichen wurde. In dieser Hauptstudie wurden vier unterschiedliche Fehlerarten, der NASA-TLX Score und die benötigte Zeit gemessen, um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Methoden zu erschaffen.

Der erste Punkt in diesem Kapitel beschäftigt sich mit dem Studiendesign, welches aufgrund der Ähnlichkeit mit der vorherigen Benutzerstudie nicht ausführlich beschrieben wird. Die unterschiedlichen Arten von Feedback werden anschließend genauer betrachtet. Es folgt eine Übersicht über die Probanden dieser Studie und ein Aufbau der Umgebung für die Hauptstudie. Anschließend wird der reguläre Ablauf genauer beschrieben, die Resultate analysiert und eine Diskussion über die Deutung dieser verfasst. Das Kapitel endet mit den Einschränkungen, die in dieser Hauptstudie existiert haben.

6.1. Design

Auch in dieser Benutzerstudie, wurde das Repeated-Measure-Design benutzt. Jeder Proband hatte zwei Aufträge zu erledigen, bei denen er eine Packliste oder den konstruierten Projektorhelm als Unterstützung erhalten hat. Um Lerneffekte auszuschließen, wurde ein Counter-balanced-Design verwendet. Das verwendete Muster ist in der Tabelle 6.1 zu sehen. Das benutzte System war die einzige unabhängige Variable.

Proband	Conditions	
A	PbP1	PbV2
B	PbP2	PbV1
C	PbV1	PbV2
D	PbV2	PbV1

Tabelle 6.1.: Counter-balanced Variablen für die Benutzerstudie.

6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps

6.1.1. Abhängige Variablen

Neben der Gesamtfehleranzahl innerhalb eines Auftrags, wurde zwischen vier unterschiedlichen Fehlerarten unterschieden.

- **Start-Error:** bezeichnet die Entnahme aus einem falschen Entnahmehort.
- **Target-Error:** bezeichnet die Ablage in den falschen Ablageort.
- **Count-Error:** bezeichnet eine falsche Entnahme- und/oder Ablagemenge.
- **Line-Error:** bezeichnet das Überspringen/Vergessen einer gesamten Zeile. innerhalb der Packliste

Beim Count-Error wurde nicht zwischen der falschen Entnahme- und Ablagemenge unterschieden, da vorausgesetzt wurde, dass diese identisch ist. Bei fallengelassenen Gegenständen und damit einer Abweichung wurde dies handschriftlich vermerkt und hat einen Einfluss auf den später folgenden Diskussions-Teil, zählt jedoch nicht als eigenständiger Fehler.

Neben den vier Fehlerarten und der Gesamtfehlerzahl, wurden zudem die benötigten Zeiten gemessen. Es gibt insgesamt drei unterschiedliche Zeitarten.

- **Order-Time:** bezeichnet die gesamte Zeit, die für einen Auftrag benötigt wurde.
- **Start-Time:** bezeichnet die Zeit, die ein Proband benötigt hat, um die erforderliche Anzahl an Gegenständen aus einem Regalfach zu entnehmen.
- **Target-Time:** beinhaltet den Wert der Start-Time und die Zeit, die zum Ablegen der entnommenen Gegenstände am Ablageort benötigt wurde und kann auch als Zeit für die Erledigung einer Aufgabe betrachtet werden.

Eine Aufgabe zählte als abgeschlossen, sobald die aufgenommenen Gegenstände an einem der drei Ablageorte abgelegt wurden.

Es wurden zwei unterschiedliche Dateien erzeugt, die die oben genannten Informationen beinhalten.

Jeder Proband musste nach jeweils einem Auftrag die Fragen aus dem NASA-TLX beantworten.

Nach Erledigung des zweiten Auftrags musste der Proband sich entscheiden, welche Methode für die Kommissionierung ihm besser gefallen hat. Dabei wurde der Proband darauf hingewiesen, dass er die Passform und das Gewicht des Helms nicht mit zu berücksichtigen hat.

Anschließend erfolgte eine kleine Diskussion, in dem der Proband Positives, wie auch Negatives über beide Methoden sagen musste. Zum Abschluss wurde der Proband gefragt, was dieser am Helm verbessern würde, wenn er es könnte.

6.2. Teilnehmer

Bei dieser Benutzerstudie haben 16 Teilnehmer teilgenommen. Von den 16 Probanden haben vier bereits an der vorherigen Benutzerstudie teilgenommen. Zehn Teilnehmer waren männlich, der Rest weiblich. Das durchschnittliche Alter betrug 23,8 Jahre, die Standardabweichung 6,34 Jahre. Von den Probanden waren 13 Studenten aus technischen Studiengängen und drei arbeiteten außerhalb der Universität Stuttgart. Der jüngste Proband war 19 Jahre alt, der Älteste 37 Jahre. Sämtliche Probanden erklärten, dass sie fit genug sind, um an der Benutzerstudie teilzunehmen.

6.3. Aufbau

An einer Wand wurden drei große Regale aufgebaut, die über jeweils zehn Regalfächer verfügen. In jedem Regalfach befanden sich insgesamt zehn gleich farbige Lego Steine. Es wurden zwar unterschiedliche Formen benutzt, diese waren nicht von weiterer Bedeutung. Damit ergaben sich insgesamt 30 unterschiedliche Regalfächer, die als Entnahmestellen dienten. Um die Gefahr von Kollisionen zwischen Helm und Regal zu verringern, wurde eine weiße Papierlinie vor dem Boden der Regale geklebt, die als Sicherheitszone diente. Die Probanden wurden hierfür nicht explizit darauf hingewiesen, sondern haben erst nach Nachfrage, sofern diese erfolgt ist, den Zweck der Papierlinie erfahren. Jedes Regalfach wurde durch einen Aufkleber mit einer vierstelligen Nummer genau definiert. Um dafür zu sorgen, dass die Teilnehmer sich nicht anhand der Nummern orientieren konnten, wurden diese ohne erkennbares Muster angeordnet.

Gegenüber der Regale befand sich ein Tisch, der über drei unterschiedliche Ablageorte verfügte, die ebenfalls jeweils mit einer vierstelligen Nummer versehen waren. Die Abtrennung der Ablageorte erfolgte über weiße Papierstreifen.

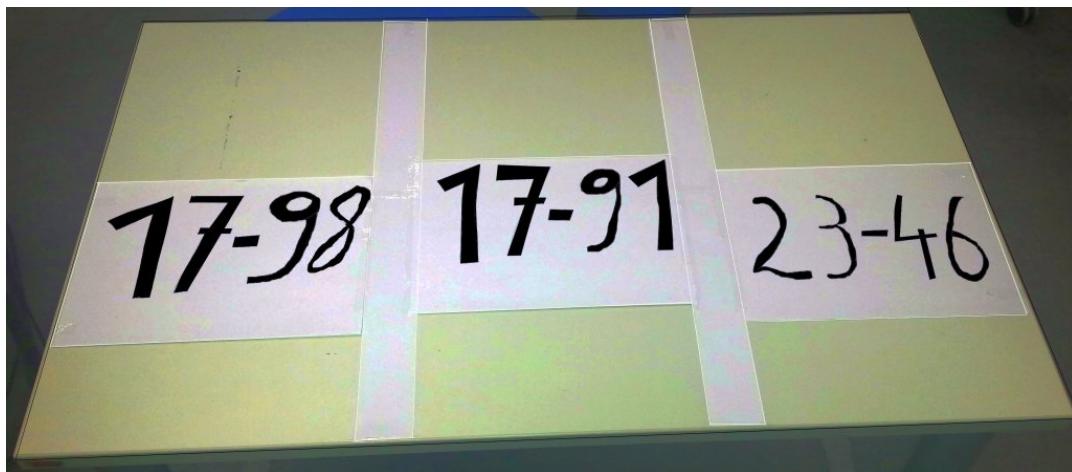


Abbildung 6.1.: Ablageorte der Benutzerstudie.

6.4. Ablauf

Die Probanden, die nicht bereits in der Vorstudie teilgenommen haben, wurden anfangs über die Diplomarbeit kurz aufgeklärt und wie die Benutzerstudie verlaufen wird. Je nachdem, mit welcher Condition sie anfangen mussten, erfolgte eine Aufklärung über die Pick-by-Paper (= Einsatz einer Packliste) oder Pick-by-Vision Methode (= Einsatz des Projektorhelms). Die meisten Literaturquellen verstehen zwar unter Pick-by-Vision den Einsatz eines Head-Mounted-Displays (HMD), in dieser Diplomarbeit sehen wir unseren Projektorhelm jedoch als eine Alternative zum HMD und verwenden deshalb ebenfalls diese Bezeichnung.

Anschließend musste jeder Proband eine Einverständniserklärung unterschreiben, welche in deutscher und englischer Sprache angeboten wurde. Nach Beendigung einer der beiden Methoden, mussten die Teilnehmer den NASA-TLX am Computer ausfüllen.

Pick-by-Paper

Für diese Methode bekamen die Teilnehmer eine Packliste (siehe Anhang), die tabellarisch sortiert war. Jede Zeile bedeutet eine Aufgabe. Jede Reihe beinhaltet folgende Informationen:

- **Position:** Ein simpler Index, um eine Zuordnung zu erleichtern.
- **Artikelnummer:** Diese Angabe diente dazu, die Übersichtlichkeit zu reduzieren.
- **Menge:** Die Menge der zu entnehmenden und abzulegenden Lego Steine.
- **Entnahmeort:** Der Ort, an dem eine bestimmte Anzahl Steine entnommen werden mussten.
- **Ablageort:** Der Ort, an dem die entnommenen Lego Steine abgelegt werden mussten.
- **Preis:** Der Preis hat die gleiche Funktion, wie die Artikelnummer gehabt.
- **Checkbox:** Eine freie Fläche, bei der die Nutzer einen Haken oder Ähnliches setzen konnten, bei Bedarf.

Eine Abbildung der verwendeten Packlisten befindet sich im Anhang. Die Probanden wurden im Vorfeld darüber aufgeklärt, dass nur der Entnahmeort, der Ablageort und die Menge für sie von Bedeutung sind. Alternativ konnte auch die Checkbox genutzt werden, um Positionen abhaken zu können. Dies war jedoch freiwillig. Es stand den Probanden frei, die Liste an einem bestimmten Ort zu haben und sich die Informationen zu merken, oder die Liste stetig mit sich herum zu führen.



Abbildung 6.2.: Ein Proband bei der Erledigung eines Auftrags mittels einer Packliste.

Pick-by-Vision

Der Pick-by-Vision Ansatz ist bei unserer Benutzerstudie die Nutzung des entwickelten Projektorhelms. Dieser gab den Benutzern Anweisungen in Form von Richtungspfeilen, in diese sie sich bewegen mussten. Da es bei den Pfeilen schnell zu Verwirrung führen konnte, bekam jeder Proband vor dem Einsatz des Projektorhelms ein Bild vorgelegt, auf dem sämtliche verfügbare Elemente dargestellt waren (siehe Abbildung 5.2.). Ebenso wurden die Probanden darüber aufgeklärt, wie der Helm zu tragen ist, bzw. bekamen Hilfestellung bei der Anpassung des Helmes an den Kopf. Da der Projektorhelm, anders als die Packliste, etwas "Neues" dargestellt hat, durfte jeder Teilnehmer einen Probendurchlauf starten, in Form der Erledigung eines fest definierten kleinen Auftrags mit zwei Aufgaben, bei dem jedoch keine Messungen vorgenommen wurden. Bei diesem Test-Auftrag durften sich die Probanden Zeit lassen und bekamen währenddessen ein genaueres Feedback, ob ihre Bewegungen korrekt waren. Es war den Probanden erlaubt, den Testauftrag zu wiederholen.

Nachdem der Proband durch die Pfeildarstellungen zum korrekten Entnahmestandort geführt wurde, verfärbte sich der Bildschirm zuerst gelb und mittig wurde die Entnahmemenge, in Form einer schwarzen Zahl, angezeigt. Durch eine erkannte Interaktion, die mittels des "Wizard of Oz"-Konzepts realisiert wurde, verfärbte sich die Projektionsfläche grün, was dem Benutzer anzeigen sollte, dass seine Hände erkannt wurden (siehe Abbildung 6.3.). Nachdem innerhalb der Projektionsfläche keine Hand mehr erkannt wurde, erfolgte ein Rotationspfeil, der eine Linksdrehung zum Ablageort angezeigt hat. Anschließend wurde der Nutzer durch weitere Richtungspfeile zum Ablageort geführt. Dort wurde nach dem gleichen Farbmuster zuerst der Ablageort gelb und die anschließende erkannte Interaktion grün dargestellt.

6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps



Abbildung 6.3.: Eine erkannte Interaktion eines Probanden innerhalb der Start-Zone.

Wenn noch weitere Aufgaben im aktuellen Auftrag vorhanden waren, wurde nach Ablegen der Gegenstände ein Rotationspfeil nach rechts dargestellt und schließlich die Richtungspfeile zum nächsten Entnahmestandort angezeigt und damit die nächste Aufgabe gestartet. Andernfalls hat sich die Projektionsfläche blau verfärbt, was als erfolgreiche Beendigung des Auftrags zu verstehen war.

Sobald der Proband mit beiden Methoden jeweils einen Auftrag ausgeführt hat, wurden die Basisfragen (Alter, Studiengang, bisherige Erfahrungen) gestellt. Anschließend erfolgte eine kleine Diskussion, in welcher die Probanden Fragen bezüglich ihrer gemachten Erfahrung gestellt bekommen haben und standen zum Schluss vor der Entscheidung, welche Methode sie vorziehen würden. Als Belohnung durften sich die Probanden Süßigkeiten aussuchen.

6.5. Resultate

Während der Benutzerstudie wurden objektive, als auch subjektive Ergebnisse gesammelt, welche im Folgenden dargestellt werden. Sämtliche präsentierte Daten beziehen sich auf die insgesamt 320 absolvierten Aufgaben der 16 Probanden innerhalb von zwei Conditions pro Teilnehmer. Zu den Ergebnissen zählen verschiedene Zeiten, der NASA-TLX Score, sowie die gemachten Fehler. Die Zeiten- und Fehlermessungen sind in Subkategorien unterteilt, welche im Folgenden genauer dargestellt werden.

Zeit-Resultate

Es werden die drei gemessenen Zeitwerte zuerst separat betrachtet. Bei der Start-Time hat der Pick-by-Vision Ansatz sich leicht besser geschlagen, als die Pick-by-Paper Methode. Die Zielführung zum Entnahmestandort brauchte im Durchschnitt 12,602 Sekunden, mit einer Standardabweichung von 5,440 und einem Standardfehler von 0,430. Die Pick-by-Paper Methode war hier mit $M = 13,531$, $SD = 6,993$ und $SE = 5,52$ unterlegen.

Bei der Target-Time hat Pick-by-Paper hingegen besser abgeschnitten. $M = 17,512$, $SD = 8,225$ und $SE = 0,650$ waren die Werte der Packliste, während der Projektorhelm lediglich $M = 20,449$, $SD = 7,247$ und $SE = 0,440$ vorzuweisen hatte. Die Signifikanztests ergaben für die Start-Time $F(1,318) = 1,759$, $p = \text{n.s.}$ und für die Target-Time $F(1,318) = 11,484$, $p = 0,001$. Abbildung 6.4 zeigt beide Diagramme.

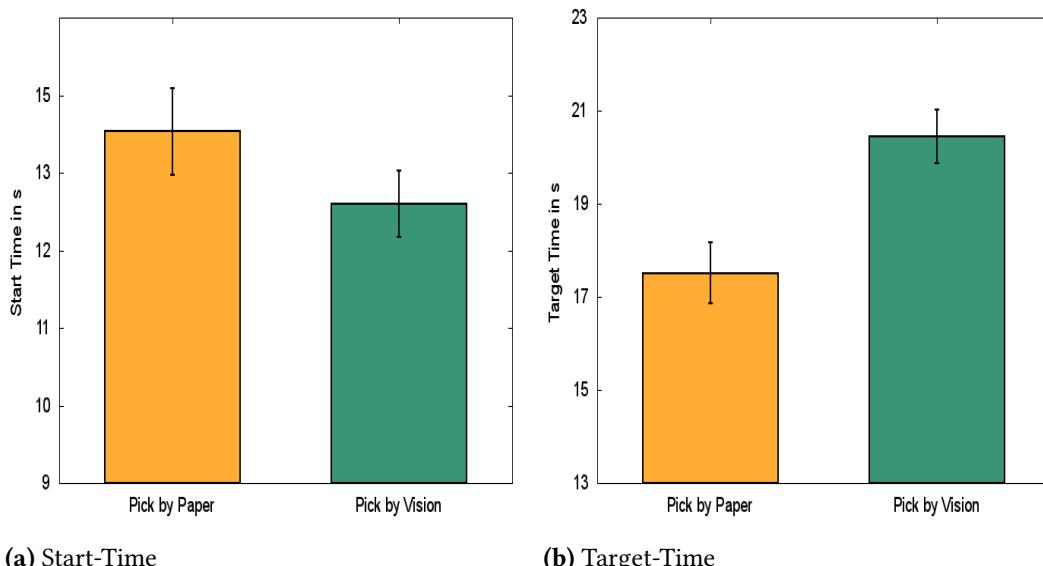


Abbildung 6.4.: Durchschnittliche Zeiten, für eine Entnahme aus dem Entnahmestandort und der durchschnittlichen Zeit für die Erledigung einer Aufgabe.

Durch die signifikant schlechteren Werte bei der Target-Time, geht auch die Packliste als klarer Sieger bei der Gesamtzeit hervor. Die Erklärung hierfür erfolgt in der Diskussions-Sektion.

6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps

Für die vollständige Erledigung von zehn Aufgaben hat der Helm die Werte: $M = 173,382$ Sekunden, $SD = 39,134$ und $SE = 9,783$, der Projektorhelm hingegen: $M = 210,020$, $SD = 43,515$ und $SE = 10,878$. Die Gesamtzeiten beim Projektorhelm sind ebenso, wie die Target-Time, signifikant höher, $F(1,30) = 6,333$, $p = 0.017$.

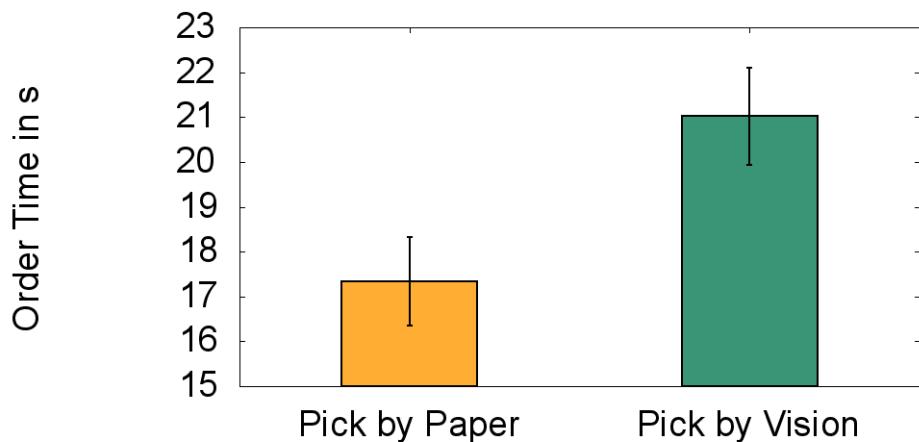


Abbildung 6.5.: Durchschnittliche Zeiten für eine Entnahme aus dem Entnahmestandort und für die Erledigung einer Aufgabe.

TLX-Resultate

Anders als bei den Zeit-Messungen, in denen der Helm schlechtere Werte erhalten hat, überdecken sich die gemessenen TLX-Werte mit den Meinungen der Probanden bei deren abschließenden Fragen.

Der durchschnittliche NASA-TLX Score für die Packliste hat 43,38 betragen, mit einer Standardabweichung von 16,169 und einem Standardfehler von 4,042. Diese Werte sind beim Projektorhelm signifikant niedriger, $F(1,30) = 13,079$, $p = 0,017$. $M = 25,38$, $SD = 11,615$ und $SE = 2,904$ zeigen, dass alle drei Werte besser sind.

Fehler-Resultate

Bei den Fehlern waren die Resultate bei beiden Methoden sehr ähnlich. Bei der Pick-by-Paper Methode hat keiner der Probanden einen Line-Error begangen. Während Start-Errors beim Projektor leicht häufiger aufgetreten waren, aufgrund eines Nichtbefolgens von Anweisungen ($M = 0.31$, $SD = 0.704$ und $SE = 0.176$), als bei der Packliste ($M = 0.13$, $SD = 0.342$ und $SE = 0.085$), waren Target-Errors im Durchschnitt gleich viele passiert ($M = 0.19$). Bei den Count-Errors hat wiederum die Packliste ($M = 0.19$, $SD = 0.544$ und $SE = 0.342$) leicht schlechter abgeschnitten, als der Projektorhelm ($M = 0.13$, $SD = 0.342$ und $SE = 0.79$). Bei der Gesamtanzahl an Fehlern hat die Packliste ebenso leichte (nicht signifikante) Vorteile aufgezeigt ($M = 1.67$, $SD = 0.894$ und $SE = 0.400$) gegenüber dem Projektorhelm ($M = 1.67$, $SD = 0.816$ und $SE = 0.333$). Der Signifikanztest ergab für die Gesamtfehler: $F(1,9) = 0.017$, $p = \text{n.s.}$

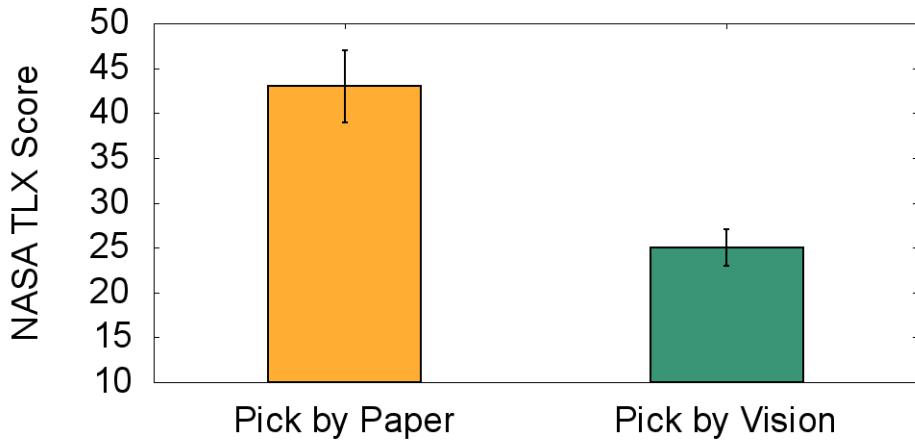


Abbildung 6.6.: Der durchschnittliche NASA-TLX Score für die Erledigung einer Aufgabe, inklusive des Standardfehlers.

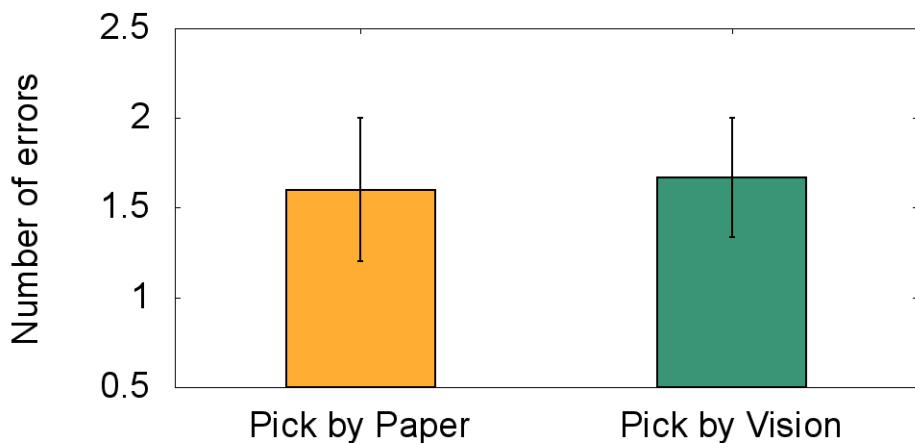


Abbildung 6.7.: Die durchschnittliche Gesamtfehleranzahl für die Erledigung einer Aufgabe, inklusive des Standardfehlers.

Subjektiver Sieger

Nach Absolvierung beider Aufträge mit den beiden unterschiedlichen Kommissioniermethoden musste jeder Proband angeben, welche Methode er bevorzugt.

Die Ergebnisse waren relativ eindeutig:

- **Pick-by-Vision:** 12
- **Pick-by-Paper:** 4

6. Evaluierung des Kommissionierungs-Prototyps

Die subjektiven Meinungen hingegen waren anders als bei der vorherigen Benutzerstudie sehr positiv.

Einer der interessanten Aspekte war die eigentliche Führung zum Ziel. Während die meisten Probanden es als sehr angenehm empfanden, selbst nicht mehr nach dem korrekten Entnahmestandort zu suchen, sondern lediglich Pfeilen zu folgen, empfanden es andere als störend. Sie beklagten, dass dadurch der Faktor Mensch quasi völlig ausgeblendet wird und stattdessen Anweisungen blind befolgt werden müssen, ohne sich selbst einbringen zu können, so dass eine Nutzung von Robotern bei dieser Methode, nach ihrer Meinung, sinnvoller gewesen wäre.

Die zwei Probanden die ein Mitdenken als störend empfunden haben, haben den Helm als bessere Möglichkeit eingestuft. Der dritte Befürworter von Pick-by-Paper hatte bei der Erledigung des Auftrags große Probleme mit dem Tragen des Helms, weshalb dieser den Helm als ungeeignet eingestuft hat, obwohl beim positiven und negativen Feedback der Helm sonst als klar besser bewertet wurde.

Probanden, die Feedback dazu abgegeben haben, wie sie die Führung zum Entnahmestandort empfunden haben, wurden noch gefragt, ob sie ein Tracking der Blickrichtung und Ortung der Kopfposition bevorzugt hätten. Lediglich ein Proband empfand das Prinzip der Head-Mounted-Displays als besser. Acht Probanden hätten es als störend empfunden, weil sie sich sonst gezwungen gesehen hätten, selbst mehr mitzudenken und damit zu viele Parallelen zur Packliste gesehen haben. Ein Proband hätte eine Kombination aus beiden bevorzugt, konnte jedoch keinen Vorschlag liefern, wie eine gute Kombination auszusehen hätte.

Sämtliche Probanden gaben an, dass es vorteilhaft wäre, einen weiteren Projektorhelm zu konstruieren, der angenehmer zu tragen ist und möglichst keine Kabel mehr benötigt.

6.6. Diskussion

Obwohl der Projektorhelm schlechtere Zeitresultate als die Pick-by-Paper Methode hatte, bedeutet dies nicht, dass der Helm bei einem anderen Aufbau ebenso hohe Zeiten erzielt hätte. Es war im Nachhinein ein großer Fehler, nur drei Ablageorte zu benutzen. Bei der Packliste war es deutlich schneller klar, in welcher der drei Zonen die Gegenstände abgelegt werden mussten, so dass bei den meisten Probanden sich ein Lerneffekt entwickelt hatte. Dieser erfolgte beim Projektorhelm nicht, da die korrekte Interaktionszone erst angezeigt wurde, als der Proband davor stand, bzw. darauf geschaut hat.

Ein anderer Grund hierfür war der starke Neigungswinkel des Kopfes beim Ablageort. Zusätzlich war die Projektionsrichtung nicht übereinstimmend mit der Blickrichtung, was eine zusätzliche Erschwerung mit sich gebracht hat.

Jedoch war das ausschlaggebende KO-Kriterium mit großer Wahrscheinlichkeit die Verkabelung. Aufgrund der Kabel sind viele Probanden langsamer vorgegangen. Manche haben sogar aus Eigeninitiative bei Drehungen die Kabel gehalten, um nicht über diese zu stolpern oder Ähnliches.

Bei den Target-Errors könnte man bei der Pick-by-Paper Methode noch einige Fehler hinzuzählen, da mehrere Probanden die Gegenstände eher auf den Ablageort geworfen haben, um Zeit zu sparen. Dabei sind mehrmals auch mehrere Lego Steine vom Ablageort gefallen. Bei der Helm-Variante war dies hingegen nicht passiert, weil die Probanden durch den Interaktionsalgorithmus, in Form des

"Wizard of Oz"-Prinzips, sich gezwungen sahen, dies eher korrekt auszuführen.

Ebenso konnte beobachtet werden, dass bei mehr als fünf zu entnehmenden Gegenständen, die Probanden bei der Packliste Probleme hatten, während beim Projektorhelm die Probleme ausblieben, da eine zweite Hand hinzugenommen wurde. Ein Verlieren von einem oder mehreren Gegenständen wurde nicht als Fehler gewertet.

Die Count-Errors beim Projektorhelm ergaben sich durch Nichtbeachtung vorher definierter Regeln. Es wurde den Probanden nicht erlaubt, aus unteren Fächern Gegenstände zu entnehmen falls das vom Blickwinkel weiter oben gesehene Regalfach bereits als richtige Zone angezeigt wurde.

6.7. Einschränkungen

Wie auch bereits in der vorherigen Studie, war der Tragekomfort des Helms eine große Einschränkung. Probanden mit kleineren Köpfen hatten größere Probleme den Helm zu tragen und mussten ihn mit einer Hand zusätzlich halten.

Die am Projektorhelm verbundenen Kabel haben dafür gesorgt, dass Probanden sich vorsichtig bewegen mussten und schnelle Bewegungen nur unter Vorsicht erlaubt waren. Ebenso war der Prototyp darauf beschränkt, Bewegungen nur soweit zu erlauben, dass dadurch keine Gefährdung für das Herausreißen eines Kabels entsteht oder es bei Interaktionen zu Kollisionen mit dem Regal kommt. Aus diesem Grund war es auch nicht möglich, diagonal in ein Regalfach hinein zu greifen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Diplomarbeit und eine Zusammenfassung von allen wichtigen Punkten. Das Kapitel wird durch einen Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen abgeschlossen und Vorschläge, wie diese aussehen könnten, werden aufgestellt.

Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wurde ein Projektorhelm konstruiert, der für die Pick-by-Vision Kommissioniermethode eine Alternative zu Head-Mounted-Displays darstellen soll und nicht die selben Schwächen hat. Dadurch sollen die negativen Aspekte der Pick-by-Vision Methode reduziert werden, während die Vorteile beibehalten werden. Das Ziel war es ein System zu entwickeln, dass durch Augmented Reality, eine projizierte Benutzeroberfläche und mittels einem Floor-Display eine neue Möglichkeit für die Kommissionierung aufzeigt, mit dem Ziel, eine Alternative zu Head-Mounted-Displays für die Pick-by-Vision Methode zu erschaffen. Das System basiert auf einer Microsoft Kinect, einem portablen Projektor und einem Bauarbeiterhelm, auf dem diese beiden Komponenten installiert wurden. Die Realisierung wird in Kapitel 3 und Kapitel 5 näher beschrieben.

Das erste der beiden oberen Kapitel beschreibt die Realisierung des Floor-Displays, um die Möglichkeiten zur Interaktion mit dem Helm aufzuzeigen. Diese erfolgt über den Fuß. Es wurde abschließend eine Benutzerstudie durchgeführt, um die optimale Anzahl an Interaktionszonen herauszufinden. Das Ergebnis zeigte, dass sowohl das System, als auch der Benutzer, sehr große Probleme damit haben, wenn in Y-Richtung mehr als eine Reihe vorhanden ist. In X-Richtung lag die optimale Anzahl hinsichtlich der Fehler, der benötigten Zeit und des Nasa-TLX-Scores bei X = 3.

Kapitel 5 beschreibt die eigentliche Unterstützung bei der Kommissionierung. Der Helm blendet, je nach Position des Nutzers, Pfeile in die Projektionsfläche, die der Nutzer zu folgen hat. Wenn das richtige Regalfach erreicht ist, wird dem Nutzer dies durch eine farbige Hervorhebung der Projektionsfläche korrekt angezeigt und die Anzahl der zu entnehmenden Gegenstände ebenso eingeblendet. Sobald eine Interaktion erkannt ist, wird dies durch eine andere Farbe deutlich gemacht. Nachdem keine Interaktion innerhalb des Regalfachs mehr erkannt wird, weist der Helm den Träger zum Ablageort, der ebenfalls farbig hervorgehoben wird.

Auch für diesen Anwendungsfall wurde eine Benutzerstudie erstellt und durchgeführt, in der sich der Projektorhelm gegen die Pick-by-Paper Methode behaupten musste. Die Probanden mussten bei beiden Methoden Gegenstände aus einem Entnahmestandort zu einem Ablageort bringen. Dabei wurden die benötigte Zeit, die verursachten Fehler und der NASA-TLX-Score gemessen. In Kapitel 6 gibt es weitere Information zu dem genauen Aufbau, dem Ablauf, den Fehlerarten und vor allem den genauen Ergebnissen. Die Ergebnisse zeigen, dass 75 Prozent der Probanden den Projektorhelm einer Packliste vorziehen würden.

Ausblick

Um das Ergebnis dieser Arbeit weiter zu verbessern, müssen die Mankos verringert bzw. eliminiert werden, die bei beiden Benutzerstudien klar ersichtlich wurden. Dies betrifft überwiegend die eigentliche Konstruktion des Projektorhelms bzw. die verwendete Technik.

Das Hauptmanko lag am konstruierten Helm. Durch einen Austausch der Tiefenkamera und des Beamers, könnte man in naher Zukunft das Gewicht reduzieren und auf eine Verkabelung verzichten. Falls eine kabellose Variante nicht möglich ist, wäre der Einsatz eines Mini-PCs, den der Träger des Projektorhelms am Körper zu befestigen hat, eine brauchbare Alternative.

Aufgrund von Zeitmangel wurde auf einen effizienten Algorithmus für die Pick-Detection im Prototyp verzichtet. Dieser sollte neben der eigentlichen Erkennung der hereingreifenden Hand, auch die Anzahl der herausgenommenen Elemente überprüfen können, um dem Nutzer ein möglichst gutes Feedback anzeigen zu können.

Um die Aussagekraft der zeitlichen Messungen für den Projektorhelm weiter zu steigern, würde sich eine Langzeitstudie mit (deutlich) erhöhter Anzahl an Entnahme- und Ablageorten anbieten.

A. Anhang

Der Anhang enthält die Dokumente bzw. Fragen, die während der zweiten Benutzerstudie verwendet wurden. Da sich die Dokumente der ersten Studie nur geringfügig von den anderen Dokumenten unterscheiden, werden diese hier nicht zusätzlich gezeigt.

A. Anhang



University of Stuttgart
Germany

Human Computer Interaction Group (MCI), VIS
Prof. Dr. Albrecht Schmidt

Einverständniserklärung

BESCHREIBUNG: Sie sind hiermit dazu eingeladen an der **Benutzerstudie** für die Diplomarbeit: „**A Context-Aware Projected Augmented Reality Helmet**“, teilzunehmen.

ZEITAUFWAND: Ihre Teilnahme dauert ungefähr 20 - 25 **Minuten**.

DATENERFASSUNG: Für die Evaluation des Systems werden Zeiten und die Fehlerrate gemessen. Zusätzlich werden während der Studie Fragebögen ausgefüllt. In dieser Studie wird das zu testende System geprüft - nicht die Teilnehmer!

Bilder:

- Ich bin damit einverstanden, dass Bilder von mir nach der Studie gemacht werden.
- Ich bin **nicht** einverstanden, dass Bilder von mir nach der Studie gemacht werden.

Videos:

- Ich bin damit einverstanden, dass Videoaufnahmen von dem Arbeitsprozess nach der Studie gemacht werden.
- Ich bin **nicht** einverstanden, dass Videoaufnahmen von dem Arbeitsprozess nach der Studie gemacht werden.

RISIKEN UND NUTZEN: Mit dieser Studie sind keine Risiken verbunden. Die gesammelten Daten werden sicher und anonym gespeichert. Die gesammelten Daten werden aggregiert und anonymisiert in einer Diplomarbeit veröffentlicht. Ihre Privatsphäre bleibt erhalten.

Bezahlung: Als Bezahlung/Belohnung für Ihre Teilnahme an dieser Studie erhalten Sie **Süßigkeiten oder alternativ ein Getränk**.

RECHTE DER TEILNEHMER: Wenn Sie dieses Formular gelesen und sich dazu entschieden haben an dieser Studie teilzunehmen, ist diese Teilnahme weiterhin **freiwillig** und Sie haben das Recht, jederzeit Ihre Zustimmung zurückzuziehen und Ihre Teilnahme jederzeit abzubrechen. Sie haben das Recht spezifische Fragen nicht zu beantworten. Die Ergebnisse dieser Forschungsstudie werden möglicherweise auch bei wissenschaftlichen Konferenzen oder Expertentreffen präsentiert oder in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht.

KONTAKT INFORMATIONEN: Bei Fragen, Bedenken oder Beschwerden über diese Forschung, die Abläufe, Risiken und Nutzen, kontaktieren Sie bitte folgende Personen:
Markus Funk (markus.funk@vis.uni-stuttgart.de)
Albrecht Schmidt (albrecht.schmidt@vis.uni-stuttgart.de)

Mit der Unterzeichnung dieses Dokuments stimme ich den oben genannten Bedingungen zu.

Name: _____ Unterschrift, Datum: _____

Abbildung A.1.: Die in der Benutzerstudie verwendete Einverständniserklärung in deutscher Sprache.
66

Teilnehmer: ____ Alter: ____ Studiengang/Beruf: _____ TLX ID (PbP): _____
 Geschlecht: ____ TLX ID (PbV): _____
 Bisherige Erfahrungen (Order Picking/Augmented Reality): _____

Einleitung

- Kurze Erklärung über den Inhalt der Diplomarbeit.
- Kurze Erklärung über Pick by Paper und Pick by Vision
- Pick by Paper: Liste aushändigen und Felder erläutern.
- Pick by Vision: Unterschiedliche Pfeile anhand des Bildes erklären L/R/V/Z/H/R
- Farben erklären: Gelb = Richtiges Feld, Grün = Interaktion erkannt, Weiß = Navigation, Blau = Auftrag erfolgreich abgeschlossen.
- Einverständniserklärung zum Unterschreiben geben.
- Probelauf bei PbV.

Order/Tasks:

PbP (1)	Items	Start Target	Zeit	Fehler (Start)	Fehler (Target)	Fehler (Items)
1	1	31-42/17-98				
2	3	82-21/17-91				
3	2	42-22/17-98				
4	2	16-42/23-46				
5	2	20-21/23-46				
6	1	33-42/17-98				
7	6	77-32/17-98				
8	3	39-32/17-98				
9	4	13-22/23-46				
10	7	25-21/17-91				
PbV (2)	Items	Start Target	Zeit	Fehler (Start)	Fehler (Target)	Fehler (Items)
1	2	20-21/23-46				
2	5	55-22/17-91				
3	3	39-32/23-46				
4	7	25-21/17-98				
5	2	42-22/17-91				
6	2	69-42/23-46				
7	2	52-21/23-46				
8	1	31-42/17-98				
9	3	82-21/17-91				
10	2	16-42/17-91				

Abbildung A.2.: Einer der vier Abläufe für die Benutzerstudie inklusive Einstiegsfragen.

A. Anhang

Position	Article	Count	From	To	Price	Checked
1	132-1258-21	1	31-42	17-98	0,14 €	
2	132-1453-22	3	82-21	17-91	0,72 €	
3	132-1754-74	2	42-22	17-98	0,04 €	
4	132-1841-32	2	16-42	23-46	0,08 €	
5	132-1454-18	2	20-21	23-46	0,26 €	
6	132-1617-79	1	33-42	17-98	0,12 €	
7	132-9784-32	6	77-32	17-98	1,78 €	
8	132-7824-94	3	39-32	17-98	0,78 €	
9	132-4799-21	4	13-22	23-46	0,99 €	
10	132-7847-38	7	25-21	17-91	1,94 €	

Position	Article	Count	From	To	Price	Checked
1	132-1258-21	2	20-21	23-46	0,14 €	
2	132-1453-22	5	55-22	17-91	0,72 €	
3	132-1754-74	3	39-32	23-46	0,04 €	
4	132-1841-32	7	25-21	17-98	0,08 €	
5	132-1454-18	2	42-22	17-91	0,26 €	
6	132-1617-79	2	69-42	23-46	0,12 €	
7	132-9784-32	2	52-21	23-46	1,78 €	
8	132-7824-94	1	31-42	17-98	0,78 €	
9	132-4799-21	3	82-21	17-91	0,99 €	
10	132-7847-38	2	16-42	17-91	1,94 €	

Abbildung A.3.: Die zwei verwendeten unterschiedlichen Packzettel für Pick-by-Paper.

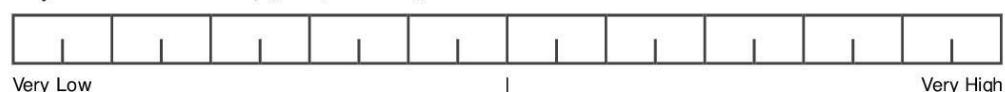
NASA Task Load Index (TLX)

There are no right or wrong answers. If something is not entirely clear, follow your intuition.

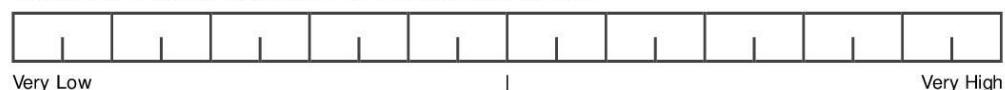
Mental Demand How mentally demanding was the task?



Physical Demand How physically demanding was the task?



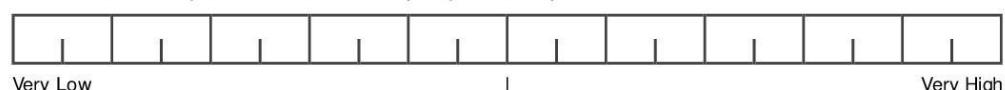
Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?



Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?



Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?



Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?

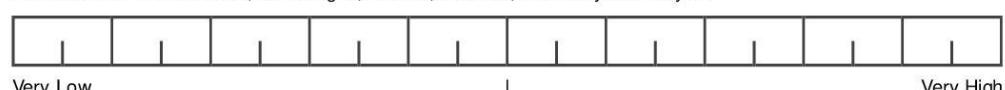


Abbildung A.4.: Der NASA-TLX in englischer Sprache.

A. Anhang

Abschließende Fragen:

Welche Methode fandest du besser?

Pick by Vision: [] Pick by Paper: []

Was fandest du bei Pick by Paper besonders gut/schlecht?

Was fandest du bei Pick by Vision besonders gut/schlecht?

Was würdest du bei Pick by Vision verbessern?

Abbildung A.5.: Abschließende Fragen für die Probanden der Benutzerstudie.

Literaturverzeichnis

- [AHJ⁺12] J. Alexander, T. Han, W. Judd, P. Irani, S. Subramanian. Putting your best foot forward: investigating real-world mappings for foot-based gestures. In *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, S. 1229–1238. 2012. (Zitiert auf Seite 17)
- [AKM⁺10] T. Augsten, K. Kaefer, R. Meusel, C. Fetzer, D. Kanitz, T. Stoff, T. Becker, C. Holz, P. Baudisch, H. Plattner. Multitoe: High-Precision Interaction with Back-Projected Floors Based on High-Resolution Multi-Touch Input. Band 23, S. 209–218. ACM, 2010. (Zitiert auf den Seiten 18, 22 und 23)
- [Azu97] R. T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4):355–385, 1997. (Zitiert auf den Seiten 15 und 22)
- [Bai08] A. Bailey, R. *Design of comparative experiments*. Cambridge University Press, New York, 2008. (Zitiert auf Seite 35)
- [Bau13] H. Baumann. *Order picking supported by mobile computing*. Dissertation, University of Bremen, 2013. (Zitiert auf den Seiten 10, 20 und 21)
- [Ber06] H. H. der gewerblichen Berufsgenossenschaften. *BGR 193 - Benutzung von Kopfschutz*. Carl Heymanns Verlag, 2006. (Zitiert auf den Seiten 7 und 25)
- [BH14] J. J. Bartholdi, S. T. Hackman. *Warehouse and Distribution Science Release 0.96*. The Supply Chain and Logistics Institute School of Industrial and Systems Engineering, 2014. (Zitiert auf Seite 10)
- [CM92] T. Caudell, D. Mizell. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In *System Sciences, 1992. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on*, Band 2, S. 659–669. 1992. (Zitiert auf den Seiten 14 und 22)
- [com15] comSCORE. UPS Pulse of the Online Shopper Eine Studie zur Kundenzufriedenheit. Technischer Bericht, comScore, 2015. (Zitiert auf den Seiten 9 und 19)
- [DIN13] Industrial safety helmets, 2013. (Zitiert auf Seite 25)
- [Eis08] D. D. Eisenstein. Analysis and Optimal Design of Discrete Order Picking Technologies Along a Line, 2008. (Zitiert auf Seite 19)
- [FKS14] M. Funk, O. Korn, A. Schmidt. Assisitive augmentation at the manual assembly workplace using in-situ projection. In *Proceeding of the chi workshop on assistive augmentation*. 2014. (Zitiert auf Seite 11)

- [FSSM⁺15] M. Funk, A. Sahami Shirazi, S. Mayer, L. Lischke, A. Schmidt. Pick from Here! - An Interactive Mobile Cart using In-Situ Projection for Order Picking. In *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. ACM, 2015. (Zitiert auf Seite 23)
- [GRX⁺14] A. Guo, S. Raghu, X. Xie, S. Ismail, X. Luo, J. Simoneau, S. Gilliland, H. Baumann, C. Southern, T. Starner. A Comparison of Order Picking Assisted by Head-up Display (HUD), Cart-mounted Display (CMD), Light, and Paper Pick List. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, S. 71–78. ACM, 2014. (Zitiert auf den Seiten 10 und 21)
- [HAK⁺11] T. Han, J. Alexander, A. Karnik, P. Irani, S. Subramanian. Kick: Investigating the Use of Kick Gestures for Mobile Interactions. In *Proceedings of the 13th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '11)*. ACM, 2011. (Zitiert auf Seite 17)
- [Han05] J. Y. Han. Low-cost Multi-touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '05, S. 115–118. ACM, 2005. (Zitiert auf Seite 18)
- [Har06] S. G. Hart. Nasa-Task Load Index (Nasa-TLX); 20 Years Later. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Band 50. 2006. (Zitiert auf Seite 36)
- [HBW11] C. Harrison, H. Benko, A. D. Wilson. OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere. *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, S. 441–450, 2011. (Zitiert auf den Seiten 16 und 22)
- [Hub14] J. Huber. A Research Overview of Mobile Projected User Interfaces. *Informatik-Spektrum*, 37(5):464–473, 2014. (Zitiert auf Seite 16)
- [KFS15] O. Korn, M. Funk, A. Schmidt. Assistive Systems for the Workplace: Towards Context-Aware Assistance. *Assistive Technologies for Physical and Cognitive Disabilities*, S. 121–135, 2015. (Zitiert auf Seite 14)
- [KLDJR06] R. d. Koster, T. Le-Duc, K. Jan Roodbergen. Design and Control of Warehouse Order Picking: a literature review. Technischer Bericht, Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 2006. (Zitiert auf Seite 19)
- [KS03] T. Karitsuka, K. Sato. A Wearable Mixed Reality with an On-Board Projector. In *Proceedings of the 2Nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '03, S. 321–. IEEE Computer Society, 2003. (Zitiert auf Seite 16)
- [LM10] N. Linder, P. Maes. LuminAR: Portable Robotic Augmented Reality Interface Design and Prototype. In *Adjunct Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, S. 395–396. ACM, New York, NY, USA, 2010. (Zitiert auf den Seiten 15 und 22)

- [MTUK94] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, F. Kishino. Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In *Proceedings of the SPIE Conference on Telemanipulator and Telepresence Technologies*, Proceedings of SPIE, S. 282–292. 1994. (Zitiert auf den Seiten 7, 14, 15 und 22)
- [NTDM13] C. Nock, O. Taugourdeau, S. Delagrange, C. Messier. Assessing the Potential of Low-Cost 3D Cameras for the Rapid Measurement of Plant Woody Structure. *Sensors*, 13(12):16216–16233, 2013. (Zitiert auf Seite 27)
- [Pic14] S. Pickl. Augmented Reality for Order Picking Using Wearable Computers with Head-Mounted Displays, 2014. (Zitiert auf Seite 10)
- [Pin01] C. S. Pinhanez. The Everywhere Displays Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing*, UbiComp '01, S. 315–331. Springer-Verlag, London, UK, UK, 2001. (Zitiert auf den Seiten 15 und 22)
- [PM08] P. J. Parikh, R. D. Meller. Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5):696–719, 2008. (Zitiert auf Seite 20)
- [RBW05] H. Regenbrecht, G. Baratoff, W. Wilke. Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 25(6):48–56, 2005. (Zitiert auf Seite 14)
- [RG09] R. Reif, W. A. Gunthner. Pick-by-Vision: An Augmented Reality supported Picking System. In *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*, S. 115–124. 2009. (Zitiert auf Seite 10)
- [RGG12] T. Rammelmeier, S. Galka, W. A. Guenthner. Fehlervermeidung in der Kommissionierung. In *8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft fuer Technische Logistik e. V.*, S. 118–125. Otto-von-Guericke-Universitaet, Zadek, H., 2012. (Zitiert auf den Seiten 21 und 22)
- [SDYT10] J. Scott, D. Dearman, K. Yatani, K. N. Truong. Sensing Foot Gestures from the Pocket. In *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, S. 199–208. ACM, 2010. (Zitiert auf Seite 18)
- [SPHK08] B. Schwerdtfeger, D. Pustka, A. Hofhauser, G. Klinker. Using Laser Projectors for Augmented Reality. In *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '08, S. 134–137. ACM, New York, NY, USA, 2008. (Zitiert auf Seite 16)
- [SRG⁺09] B. Schwerdtfeger, R. Reif, W. A. Gunthner, G. Klinker, D. Hamacher, L. Schega, I. Bockelmann, F. Doil, J. Tumler. Pick-by-Vision: A first stress test. In *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*, S. 115–124. IEEE, 2009. (Zitiert auf den Seiten 10 und 21)
- [Tom10] J. A. Tompkins. *Facilities planning*. John Wiley & Sons, 2010. (Zitiert auf Seite 18)

Literaturverzeichnis

- [UI98] J. Underkoffler, H. Ishii. Illuminating Light: An Optical Design Tool with a Luminous-tangible Interface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, S. 542–549. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 1998. (Zitiert auf Seite 15)
- [VC96] E. Vonesh, V. M. Chinchilli. *Linear and nonlinear models for the analysis of repeated measurements*. CRC press, 1996. (Zitiert auf Seite 35)
- [WSDR14] C. Winkler, J. Seifert, D. Dobbelstein, E. Rukzio. Pervasive Information Through Constant Personal Projection: The Ambient Mobile Pervasive Display (AMP-D). In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, S. 4117–4126. ACM, 2014. (Zitiert auf den Seiten 16 und 22)
- [YTY08] T. Yamamoto, M. Tsukamoto, T. Yoshihisa. Foot-Step Input Method for Operation Information Devices While Jogging. In *Applications and the Internet, 2008. SAINT 2008. International Symposium on*, International Symposium on Applications and the Internet, 2008, S. 173–176. IEEE, Turku, 2008. (Zitiert auf Seite 17)

Alle URLs wurden zuletzt am 05. Juni 2015 geprüft.

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet. Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht. Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

Ort, Datum, Unterschrift