

UNTERSUCHUNGEN ZU NUTZERBEZOGENEN UND  
TECHNISCHEN ASPEKTEN BEIM  
LANGZEITEINSATZ MOBILER AUGMENTED  
REALITY SYSTEME IN INDUSTRIELLEN  
ANWENDUNGEN

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

angenommen durch die Fakultät für Informatik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dipl.-Ing.-Inf. Johannes Tümler  
geb. am: 28.06.1981 in Schönebeck / Elbe

Gutachterinnen/Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Paul  
Prof. Dr. rer. nat. Eberhard A. Pfister  
Prof. Gudrun J. Klinker, Ph.D.  
Dr.-Ing. Werner Schreiber

Ort und Datum des Promotionskolloquiums:  
Magdeburg, den 08.10.2009



---

OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

FAKULTÄT FÜR INFORMATIK  
Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme

---



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Fakultät für Informatik  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg

---

---

# Danksagung

Vielen Menschen schulde ich für die tatkräftige Unterstützung während der Zeit der Erstellung dieser Doktorarbeit einen herzlichen Dank. Zunächst danke ich meinen Eltern Hans und Sabine sowie meiner verlobten Judith Werner dafür, dass Sie diese Arbeit ermöglicht und stets unterstützt haben. Ohne Eure Hilfe hätte das alles nicht funktioniert!

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Paul, für die stets sehr gute Zusammenarbeit, die zahlreichen guten Gespräche, die daraus entstandenen Ideen und das nicht selbstverständliche persönliche Engagement! Weiterhin bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Rüdiger Mecke und Dr.-Ing. Werner Schreiber für das Ermöglichen dieser Arbeit, die guten Hinweise aus der Praxis und ebenfalls für den persönlichen Einsatz.

Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit trug die aktive Unterstützung des Bereichs Arbeitsmedizin (bis 2008 Institut für Arbeitsmedizin) der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg bei, insbesondere bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Eberhard A. Pfister und Frau PD Dr. med. habil. Irina Böckelmann bedanke ich mich daher an dieser Stelle.

Schließlich danke ich Christian Bade, Fabian Doil und meiner Tante Gudrun Braune für das intensive Korrekturlesen der Arbeit sowie Jian Xu und allen Studenten, Diplomanden und Probanden, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.



Durch die mobile „Augmented Reality“ Technologie werden Informationen situationsgerecht mittels geeigneter mobiler Anzeigegeräte im Sichtfeld eines Anwenders dargestellt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Langzeiteinsatzes mobiler Augmented Reality Systeme in einem industriellen Umfeld.

Insbesondere in komplexen industriellen Szenarien eignet sich der Einsatz mobiler Augmented Reality zur Vermeidung von Fehlern und zur Verkürzung von Durchführungszeiten. Obwohl diese Vorteile für die Optimierung industrieller Prozesse seit langem bekannt sind und wesentliche Untersuchungen zu technischen sowie anwendungsbezogenen Fragestellungen durchgeführt wurden, existieren bisher kaum Anwendungen, die die mobile Augmented Reality produktiv einsetzen. Dies wird unter anderem auf den heute ungenügenden Forschungsstand im Bereich der nutzerbezogenen Fragestellungen zurückgeführt.

Die vorliegende Arbeit entwickelt Ansätze zur Untersuchung solcher nutzerbezogenen Fragestellungen, indem ein Konzept zur Durchführung von Langzeitprobandenstudien an einem Referenzarbeitsplatz vorgeschlagen wird. Dieses Konzept dient zur Analyse der Auswirkungen des Langzeiteinsatzes mobiler Augmented Reality auf den Anwender, um daraus ermitteln zu können, wie mobile Augmented Reality Systeme gestaltet sein müssen, damit Sie den Anwender effizient unterstützen. Durch eine erste Studie wird die Beanspruchung der Anwender beim Langzeiteinsatz eines heute verfügbaren mobilen Augmented Reality Systems untersucht und zu verbessernde Systemkomponenten identifiziert. Es wird nachgewiesen, dass bereits durch heute verfügbare Systeme eine Beanspruchungslage erreichbar ist, die vergleichbar zu herkömmlichen, nicht durch Augmented Reality unterstützten Systemen ist. Am Beispiel der technischen Komponente „See-Through-Kalibrierung“ wird darauf folgend eine Systemverbesserung vorgenommen und die Überlagerungsgenauigkeit sowie die Durchführungsdauer gegenüber heutigen Kalibrierungen verbessert.

---

# Abstract

Mobile “Augmented Reality” enhances user’s access to situationally relevant virtual information through the use of applicable mobile display devices. This thesis investigates the effects of long term usage of mobile Augmented Reality in industry.

The potential of mobile Augmented Reality to reduce error rates and manufacturing times is notable, especially in industrial scenarios. Even though these advantages have been recognized for several years and application-specific as well as technological factors have been researched, there has not yet been productive application of mobile Augmented Reality. One reason for this is the current lack of research in the field of user-related issues.

This thesis develops approaches for investigating user-related issues by proposing a concept for long term user studies in a laboratory setting. To determine the requirements for supporting users in an efficient manner, these approaches can be used to analyze the impact on users who utilize mobile Augmented Reality over a longer time period.

An initial study provides an analysis of users’ strain during long term use of a mobile Augmented Reality system and conclusions regarding necessary system improvements.. The results of the study demonstrate that with today’s mobile Augmented Reality systems, user strain is no greater utilizing Augmented Reality than utilizing a system without Augmented Reality. Additionally a technical component of the used Augmented Reality system is improved by raising the efficiency of the “See-Through-Calibration”.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ausgangssituation . . . . .	2
1.3	Aufgabenstellung . . . . .	3
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Wissenschaftliche Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Augmented Reality . . . . .	6
2.1.1	Definition . . . . .	6
2.1.2	Abgrenzung . . . . .	7
2.1.3	Visualisierungsarten von AR und AV-Informationen . . . . .	8
2.1.4	Mobilität der Systemelemente . . . . .	9
2.2	Mobile Augmented Reality . . . . .	11
2.2.1	Definition und Abgrenzung . . . . .	11
2.2.2	Mobiles Augmented Reality System . . . . .	12
2.2.3	Visualisierungstechniken mobiler AR-Systeme . . . . .	17
2.2.4	See-Through-Kalibrierung . . . . .	21
2.3	Zusammenfassung und Wertung . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Forschungsstand und Stand der Technik</b>	<b>28</b>
3.1	Einleitung . . . . .	28
3.2	Anwendungen . . . . .	29
3.3	Technische Aspekte . . . . .	32
3.3.1	Head Mounted Displays . . . . .	34
3.3.2	See-Through-Kalibrierung . . . . .	39
3.3.3	AR-gestützte Navigation . . . . .	41

3.4	Nutzerbezogene Aspekte . . . . .	43
3.5	Zusammenfassung und Schwerpunktauswahl . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Untersuchung zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz der AR-Technologie</b>	<b>51</b>
4.1	Einleitung und Ziele . . . . .	51
4.2	Untersuchungsstrategie . . . . .	52
4.3	Referenzarbeitsplatz . . . . .	53
4.3.1	Rahmenbedingungen für den Referenzarbeitsplatz . .	54
4.3.2	Auswahl einer Tätigkeit . . . . .	56
4.3.3	Konzept der empirischen Evaluation . . . . .	60
4.3.4	Unterstützungspotenzial der AR am Referenzarbeitsplatz	62
4.3.5	IT-Infrastruktur . . . . .	63
4.3.6	Qualitative Analyse am Referenzarbeitsplatz . . . . .	65
4.3.7	Erfassung nutzerbezogener Parameter . . . . .	66
4.3.8	Fazit und Ausblick . . . . .	70
4.4	Erstellung eines mobilen AR-Systems . . . . .	71
4.4.1	Motivation . . . . .	71
4.4.2	Auswahl eines Head Mounted Displays . . . . .	72
4.4.3	Informationsdarstellung . . . . .	72
4.4.4	Weitere Systemkomponenten . . . . .	78
4.4.5	Zusammenfassung . . . . .	79
4.5	Durchführung der Beanspruchungsanalyse am Referenzarbeitsplatz . . . . .	79
4.5.1	Versuchsplanung . . . . .	79
4.5.2	Arbeitshypothesen . . . . .	82
4.5.3	Ergebnisse und Auswertung . . . . .	83
4.5.4	Ergebnisinterpretation und Schlussfolgerungen . . . . .	91
4.6	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	93
<b>5</b>	<b>Verbesserung technischer Aspekte am Beispiel der See-Through-Kalibrierung</b>	<b>96</b>
5.1	Einleitung . . . . .	96
5.2	Entwicklung verbesserter Verfahren . . . . .	96
5.2.1	Ziele . . . . .	96
5.2.2	Analyse eines heutigen STK-Verfahrens . . . . .	97
5.2.3	Verkürzung der Durchführungsdauer . . . . .	98
5.2.4	Analysen zur Überlagerungsgenauigkeit . . . . .	99
5.3	Probandenversuch zur Analyse der Überlagerungsgenauigkeit und Durchführungsdauer . . . . .	108
5.3.1	Einleitung . . . . .	108

5.3.2	Versuchsplanung . . . . .	108
5.3.3	Arbeitshypthesen . . . . .	112
5.3.4	Ergebnisse . . . . .	113
5.3.5	Auswertung der Untersuchungen zur STK . . . . .	114
5.4	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>119</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	119
6.2	Bewertung des Problemlösungsprozesses . . . . .	122
6.3	Ausblick . . . . .	124
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XXIX</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XXX</b>
	<b>Glossar</b>	<b>XXXI</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XXXIV</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXXVII</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>XXXVIII</b>
A.1	Anforderungen an mobile AR-Systeme in der Industrie . . . . .	XXXVIII
A.1.1	Anforderungen an die Software . . . . .	XXXVIII
A.1.2	Anforderungen an die Hardware am Nutzer . . . . .	XXXVIII
A.1.3	Anforderungen an den Arbeitsplatz . . . . .	XL
A.2	Probandenaufklärung . . . . .	XLI
A.3	Fragebögen der Nutzerstudie zur Beanspruchung am Referenzarbeitsplatz . . . . .	XLIII
A.4	Fragebögen der Nutzerstudie zum Vergleich zweier STK-Verfahren . . . . .	XLVIII
A.5	HMD Recherche . . . . .	L
A.6	Fördervermerk, Studentische Arbeiten, Patente . . . . .	LV
A.7	Liste der eigenen Veröffentlichungen . . . . .	LVI
A.7.1	2006 . . . . .	LVI
A.7.2	2007 . . . . .	LVI
A.7.3	2008 . . . . .	LVI
A.7.4	2009 . . . . .	LVIII
A.7.5	2009 eingereicht . . . . .	LVIII
A.8	Wissenschaftlicher Werdegang . . . . .	LX

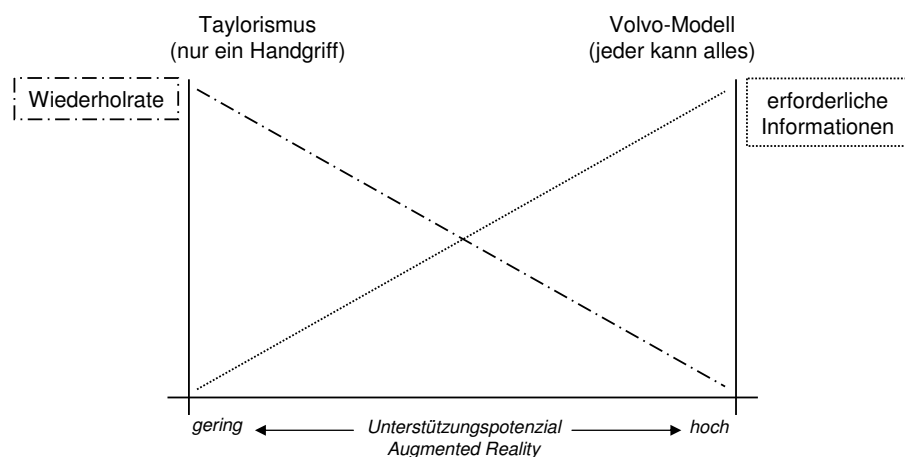
# 1

## Einleitung und Aufgabenstellung

### 1.1 Motivation

Wesentliche Herausforderungen für die Industrie werden heute durch Kundenwünsche nach mehr Modellen, individuellen Produktvarianten sowie durch strengere gesetzliche Auflagen und den damit gestiegenen Anforderungen an die herzustellenden Produkte bestimmt. Diese Anforderungen betreffen neben der Erhöhung der Produktqualität auch die Beherrschung der damit einhergehenden steigenden Produktkomplexität [MSG07]. Daher sind geeignete Formen der Arbeitsorganisation sowie unterstützende informationstechnische Hilfsmittel erforderlich, um auf diese Anforderungen reagieren zu können.

Abbildung 1.1: Schematische Gegenüberstellung der Wiederholrate einzelner Arbeitsschritte, des dabei erforderlichen Informationsbedarfs und des Unterstützungspotenzials der Augmented Reality



Quelle: eigener Entwurf

Mögliche Formen der Arbeitsorganisation liegen zwischen den beiden Extremen „Taylorismus“ [Tay11], bei dem ein einzelner Werker konsequent einen oder wenige einzelne Arbeitsschritte wiederholt ausführt und dem „Volvo-Udevalla-Modell“ [Hay97], bei dem theoretisch jeder Werker alle notwendigen Arbeitsschritte zur Fertigstellung eines Produkts ausführen kann und somit die Wiederholrate minimal ist. Bei beiden Modellen verhält sich der Informations-

bedarf zur Ausführung der einzelnen Arbeitsschritte umgekehrt proportional zur Wiederholrate: Je geringer die Wiederholrate, desto mehr Informationen benötigt der einzelne Werker zur korrekten Ausführung der Tätigkeiten (Abbildung 1.1). Durch die weiterhin steigende Produktkomplexität ist eine Arbeitsorganisation gemäß Taylor vielfach nicht sinnvoll, da je nach Produktvariante sehr unterschiedliche Arbeitsschritte vom einzelnen Werker durchgeführt werden müssen. Der Informationsbedarf beim Werker zur fehlerfreien Erfüllung der Arbeitsaufgaben steigt, sodass heute ein Ziel der Industrie darin besteht, geeignete Hilfsmittel zu entwickeln, die dem Werker bei der Durchführung seiner Aufgaben assistieren. Diese Hilfsmittel sollen trotz des gestiegenen Informationsbedarfs Prozesszeiten so kurz wie möglich halten, das Fehlerpotenzial verringern und komplexe Arbeitsschritte handhabbar machen. Dabei muss auch aufgrund des demografischen Wandels und dem zunehmend steigenden Durchschnittsalter der Arbeitnehmer berücksichtigt werden, dass die Hilfsmittel von jedem qualifizierten Mitarbeiter bedient werden können.

Ein mögliches Hilfsmittel, welches den Werker durch eine situationsgerechte Darbietung von Informationen dabei unterstützen kann, diese gestiegenen Anforderungen zu beherrschen, ist die Augmented Reality (AR)-Technologie [Alt02, TOBM03, Wie03]. Daher stellt die AR seit einigen Jahren einen Forschungsschwerpunkt für Deutschland dar, was sich in vergangenen [Fri04, FW06] und aktuellen [Sch08] industriegetriebenen Verbundprojekten widerspiegelt, durch die technische, anwendungsorientierte und nutzerbezogene Fragestellungen der AR-Technologie erforscht wurden und werden. Speziell zu technischen und anwendungsorientierten Themen wurden Lösungen und Prototypen entwickelt, die jedoch bisher kaum produktiv industriell eingesetzt werden.

---

## 1.2 Ausgangssituation

Dieser Dissertation gehen mehrere Arbeiten im Umfeld der Volkswagen AG und des Fraunhofer-Institutes für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) voraus. Diese Arbeiten werden nachfolgend beschrieben, ein allgemeiner Überblick über den Stand der Technik wird in Kapitel 3 präsentiert.

Im Jahr 2002 wurde der Einsatz der Augmented Reality in der Produktion untersucht [Alt02]. Diese Arbeit entstand bei der Volkswagen AG und beinhaltete unter anderem Untersuchungen zur Eignung der *mobilen AR* für die Kommissionierung. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Einsatz der mobilen AR sowohl Fehlerraten als auch Suchzeiten wesentlich verringern kann, insbesondere durch die Parallelisierung von Informationsaufnahme und Nebentätigkeiten. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die zur damaligen Zeit erhältlichen mobilen AR-Systemkomponenten noch nicht für einen Dauereinsatz geeignet waren.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen fanden 2005 im Rahmen einer Studienarbeit [Tüm05] Untersuchungen bei Volkswagen hinsichtlich der Eignung mobiler AR für die Kommissionierung statt. Es wurde dabei festgestellt, dass ein konkreter Einsatz in einem Kommissionierbereich zum damaligen Zeitpunkt nicht sinnvoll war. Die Gründe hierfür bestanden unter anderem im bisher mangelnden Wissen über den Einfluss der mobilen AR auf den Menschen.

Die Ergebnisse der Studienarbeit wurden 2006 aufgegriffen und in Form einer Diplomarbeit gemeinsam mit dem Fraunhofer IFF und der Volkswagen AG Konzernforschung weiterentwickelt [Tüm06]. Dabei entstand ein Konzept für

praxisnahe Laborversuche, durch welches quantitative Aussagen über den Einfluss der mobilen AR-Technik auf den Menschen gewonnen werden können. Offen blieb jedoch die reale Umsetzung des Versuchsbereiches.

### 1.3 Aufgabenstellung

Eine der Ursachen dafür, dass die mobile AR-Technologie noch nicht produktiv industriell eingesetzt wird, liegt darin, dass im Bereich der nutzerbezogenen Aspekte dringender Forschungsbedarf besteht [TOBM04, UII06, Fri06]. Solche „nutzerbezogenen Fragestellungen“ betreffen die Auswirkungen der Technologie auf den Anwender im (Langzeit-)Einsatz, welche unter anderem durch die Hard- und Softwareergonomie beeinflusst werden. Für die Untersuchung dieser Fragestellungen ist eine isolierte Betrachtung aus dem Blickwinkel der Informatik nicht ausreichend, daher ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit durch Einbeziehung von Partnern der Ingenieurwissenschaft, Medizin und Psychologie erforderlich (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Partner zur Verbesserung der mobilen AR

<i>Informatik</i> - Entwicklung und Evaluierung informationstechnischer Aspekte unter Berücksichtigung von Vorgaben aus den Bereichen Ingenieurwissenschaft, Medizin und Psychologie	<i>Ingenieurwissenschaft</i> - Vorgaben bereitstellen aus dem Umfeld zukünftiger AR-gestützter Anwendungen
<i>Medizin</i> - Analyse psychophysiologischer Aspekte beim Einsatz mobiler AR zur Gestaltung medizinischer Vorgaben für die AR-Hardware	<i>Psychologie</i> - Analyse der Informationswahrnehmung beim Einsatz mobiler AR für die Erstellung von Vorgaben für die Informationsgestaltung

Diese Arbeit hat das Ziel, die Auswirkungen der mobilen AR-Technologie auf den Anwender im Langzeiteinsatz zu untersuchen, wobei zunächst ein Schwerpunkt darauf liegt, heute kommerziell verfügbare Systemkomponenten für die Untersuchung zu verwenden. Im Ergebnis dieser ersten Untersuchung soll dann ein ausgewählter technischer Aspekt verbessert werden, um zukünftig nach Abschluss der vorliegenden Arbeit weitere Untersuchungen zur Beanspruchung an einem deutlich verbesserten System durchführen zu können.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung im aktuellen Kapitel gliedert sich die vorliegende Arbeit in folgende Abschnitte:

2. **Wissenschaftliche Grundlagen** - Der Begriff *Augmented Reality* wird eingeführt und erläutert. Da der Schwerpunkt der Arbeit auf dem Einsatz der mobilen AR liegt, wird danach eine Definition für den Begriff der *mobilen Augmented Reality* präsentiert und Systemelemente, Visualisierungstechniken und die oftmals notwendige See-Through-Kalibrierung erläutert.
3. **Forschungsstand und Stand der Technik** - Der Forschungsstand wird in die drei Bereiche Anwendungen, technische Aspekte und nutzerbezogene Aspekte unterteilt.



- Bei den *Anwendungen* werden dem Charakter der vorliegenden Arbeit entsprechend überwiegend Anwendungsbereiche aus dem industriellen Umfeld dargestellt.
- Nachfolgend wird auf drei *technische Bereiche* eingegangen, die für die in Kapitel 4 geplanten Untersuchungen von wesentlicher Bedeutung sind. Dies betrifft eine aktuelle Marktanalyse heutiger Head Mounted Displays, welche als Ausgabesysteme für die mobile AR genutzt werden. Für diese ist die See-Through-Kalibrierung erforderlich, deren Forschungsstand und mathematische Grundlagen nachfolgend beschrieben sind. Den Abschluss bildet eine Recherche zum Thema „AR-unterstützte Navigation“, da eine der wesentlichen Aufgaben der Anwender im in Kapitel 4 erstellten Versuchsbereich die Navigation darstellt.
- Die *nutzerbezogenen Aspekte* bilden für die vorliegende Arbeit eine wesentliche Grundlage für die anschließend durchgeführten Untersuchungen. Hier wird der Handlungsbedarf zur Durchführung von Untersuchungen zum Langzeiteinsatz der mobilen AR abgeleitet.

4. **Untersuchung zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz der AR-Technologie** - Dieses Kapitel dient zur Planung und Durchführung einer Probandenstudie zum Langzeiteinsatz der mobilen AR-Technologie. Nach der Festlegung der Ziele werden die *Untersuchungsstrategie*, die Erstellung eines *Referenzarbeitsplatzes* und des genutzten *mobilen AR-Systems* sowie die Durchführung einer ersten *Beanspruchungsanalyse* im Langzeiteinsatz beschrieben.

- Für die *Untersuchungsstrategie* wird dargelegt, dass zum Erreichen der festgelegten Ziele Untersuchungen in einem Laborumfeld notwendig sind.
- Dieses Laborumfeld wird im Folgenden als *Referenzarbeitsplatz* bezeichnet. Für diesen werden mögliche Szenarien diskutiert, bewertet und in Form eines Kommissionierbereichs aufgebaut. Anschließend wird ein Konzept für die Versuchsdurchführung entwickelt, bei dem nutzerbezogene Parameter erfasst und zusammen mit der Leistung der Anwender ausgewertet werden können.
- Um die Untersuchungen durchführen zu können, wird ein *mobiles AR-System* erstellt, wobei eines der zuvor recherchierten Head Mounted Displays zum Einsatz kommt. Für dieses mobile AR-System ist die Umsetzung einer geeigneten Navigation am Referenzarbeitsplatz erforderlich, daher wird ein Versuch zur Navigation durchgeführt.
- Die Hauptuntersuchung der vorliegenden Arbeit zur *Beanspruchungsanalyse* wird nachfolgend am Referenzarbeitsplatz unter Einsatz des erstellten mobilen AR-Systems durchgeführt. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Belastung, die das AR-System für den Anwender darstellt und ermöglichen somit die sukzessive Verbesserung von Komponenten des AR-Systems zur Optimierung der Beanspruchung beim Einsatz der mobilen AR.

5. **Verbesserung technischer Aspekte am Beispiel der See-Through-Kalibrierung** - Nach der zuvor durchgeführten Untersuchung zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz der mobilen AR konnte eine wesentliche zu verbessernde technische Komponente identifiziert werden. Diese betrifft die See-Through-Kalibrierung, die hinsichtlich ihrer Überlagerungsgenauigkeit und Handhabbarkeit verbessert werden muss. Daher werden zwei *verbesserte Verfahren* entwickelt und diese durch einen *Probandenversuch* bewertet.
- Um die Verfahren der See-Through Kalibrierung vergleichbar zu machen, werden die wesentlichen Vergleichsparameter identifiziert. Ziele und Anforderungen werden aufgeführt und bezogen auf ein heutiges Verfahren diskutiert. Danach stehen Analysen zur Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit und Verkürzung der Durchführungsdauer im Vordergrund. Dadurch können wesentlich *verbesserte Verfahren* entwickelt werden.
  - Zwei verbesserte Verfahren werden anschließend in einem *Probandenversuch* miteinander verglichen und Empfehlungen ausgesprochen, welches Verfahren in welchem Anwendungsfall eingesetzt werden sollte.
6. **Diskussion** - In diesem Abschnitt wird der Problemlösungsprozesses bewertet, die Ergebnisse der Arbeit werden zusammengefasst und diskutiert sowie ein Ausblick auf anschließend geplante Untersuchungen präsentiert.

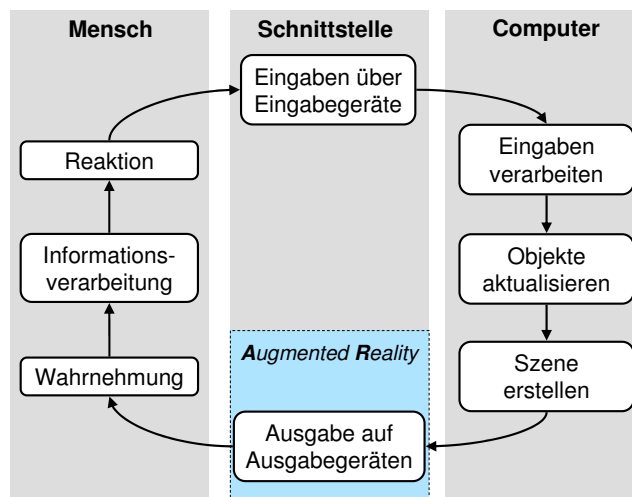
Nach den Verzeichnissen zur Literatur, Abkürzungen, Abbildungen und Tabellen enthält der Anhang der vorliegenden Arbeit unter anderem Anforderungen an mobile AR-Systeme, die genutzte Probandenaufklärung mit allen verwendeten Fragebögen und eine Recherche zu heutigen Head Mounted Displays.

## 2.1 Augmented Reality

### 2.1.1 Definition

Die Augmented Reality, zu Deutsch „erweiterte Wirklichkeit“, bezeichnet die Ergänzung der Wahrnehmung der realen Welt um virtuelle Elemente. Sie ist eine Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine (Computer), die für die Ausgabe rechnergenerierter Daten genutzt wird (Abbildung 2.1).

Abbildung 2.1: Augmented Reality als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine



Quelle: Eigener Entwurf

Allgemein bezieht sich der Begriff „Augmented Reality“ auf die Erweiterung aller Sinne:

- visuell (Sehen)
- akustisch (Hören)
- haptisch (Fühlen)

- olfaktorisch (Riechen)
- gustatorisch (Schmecken)

Anwendungen, die mehrere Wahrnehmungskanäle unterstützen, kombinieren beispielsweise optische und haptische Reize [Miz01]. Ähnliche Konzepte sind bereits auf dem Spielmarkt erhältlich, wo physische Einwirkungen auf den virtuellen Spieler für den Anwender „real erlebbar“ gemacht werden [TNG07]. Andere Arbeiten beschreiben die Erweiterung der auditiven Wahrnehmung des Menschen [ZCQY07]. In der heutigen Forschungslandschaft wird der Begriff jedoch überwiegend als eine Ergänzung der *visuellen* Wahrnehmung des Nutzers aufgefasst. Diesem Verständnis unterliegt auch die vorliegende Arbeit.

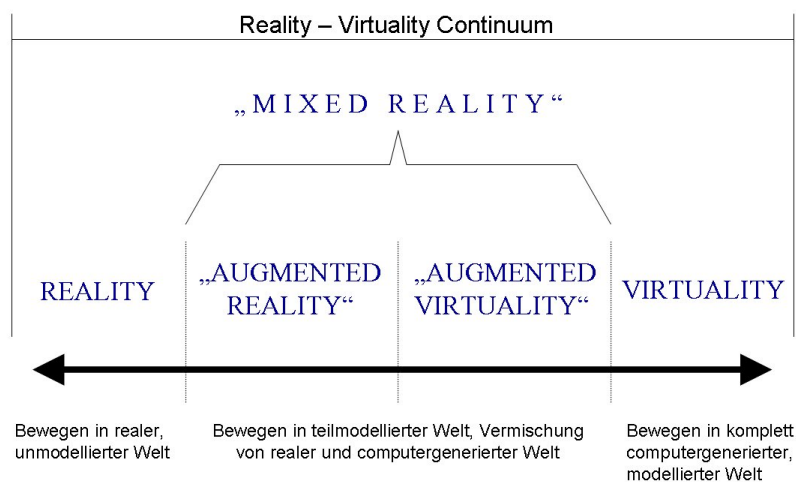
Heute bestehende Definitionen der **AR** beinhalten einerseits die situationsgerechte Darstellung virtueller Objekte mittels im Sichtfeld positionierter, computergesteuerter Anzeigegeräte [Alt02]. Andererseits werden die Merkmale „Registrierung“ und „Interaktivität“ in den Vordergrund gestellt [Azu97]. Diese Merkmale umfassen jedoch nicht alle Möglichkeiten, **AR**-Systeme zu realisieren. Werden die bestehenden Beschreibungen fusioniert, ergeben sich folgende Merkmale für die **AR**, die im Rahmen dieser Arbeit im Vordergrund stehen:

- Abbildung virtueller Elemente auf eine reale Situation (*Kontextabhängigkeit*)
- Echtzeitinteraktion des Anwenders mit realen und virtuellen Inhalten (*Interaktivität*)
- Darstellung der **AR**-Inhalte über computergesteuerte Anzeigegeräte (*Visualisierung*)

Außerhalb dieser Definition steht die Augmented Vision (**AV**). Sie beschreibt ähnlich zur **AR** die Ergänzung der Wahrnehmung um beliebige virtuelle Elemente, jedoch ohne Kontextabhängigkeit [Tüm05].

### 2.1.2 Abgrenzung

Abbildung 2.2: Reality-Virtuality Kontinuum



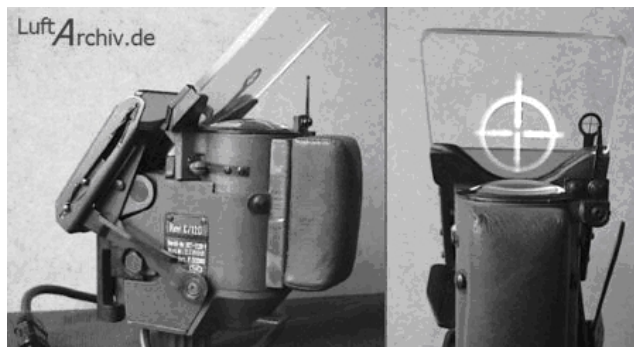
Quelle: Eigener Entwurf nach [MC99]

Die **AR** ist eng mit der Virtual Reality (**VR**) verknüpft, beide Technologien sind eine Mensch-Maschine-Schnittstelle. Im Gegensatz zur **VR**, bei der virtuelle Szenarien komplett im Computer generiert und repräsentiert werden, wird

mit Hilfe der AR die reale Welt um einige wenige virtuelle Elemente ergänzt. Der Unterschied zwischen AR und VR besteht im prozentualen Anteil computergenerierter Elemente. (Abbildung 2.2)

Auf der einen Seite steht die *Realität* (Reality), also die Welt, die die Menschen täglich umgibt, die als vollständig „echt“ und „natürlich“ wahrgenommen wird. Auf der anderen Seite steht die *Virtualität* (Virtuality), die vollständig computergeneriert und im Computer repräsentiert ist. Dazwischen sind die sogenannten *Mixed Reality*-Technologien angesiedelt: Bei der *Augmented Reality* werden dem Benutzer nur wenige virtuelle Elemente visualisiert, der Hauptteil der optischen Wahrnehmung beruht auf Elementen der realen Welt. Im Gegensatz dazu basiert die *Augmented Virtuality* sehr stark auf der Darstellung virtueller Elemente, nur wenige Elemente der realen Welt sind für den Anwender vorhanden.

Abbildung 2.3: Reflexvisier Revi C/12D



Quelle: Jean-Louis Lacour und [Gun07]

Lange bevor der Begriff „Augmented Reality“ Anfang der 1990er Jahre durch Boeing geprägt wurde [Miz01], gab es bereits Technologien, die in den Bereich AR eingeordnet werden können. Ein Beispiel für nicht-computergestützte AR ist das Reflexvisier des Typs „Revi C/12D“ aus dem Jahr 1940 (Abbildung 2.3). Dieses Gerät kam in Prototypen des Messerschmidt 109F Jagdflugzeugs zum Einsatz und spiegelten ein „virtuelles“ Fadenkreuz ins Sichtfeld des Piloten (Visualisierung). Die Position des Fadenkreuzes auf dem Display passte sich je nach Geschwindigkeit des Flugzeugs an (Kontextabhängigkeit), um eine optimale Zielsicherheit zu gewährleisten. Der Pilot konnte somit interaktiv die Visualisierung beeinflussen.

### 2.1.3 Visualisierungsarten von AR und AV-Informationen

Die Visualisierung virtueller Informationen kann in die Kategorien *kontextabhängig* und *kontextunabhängig* unterschieden werden [Alt02]. Während AV-Systeme kontextunabhängig arbeiten, besteht bei allen AR-Informationen eine logische Verknüpfung (Kontextabhängigkeit) mit Elementen der realen Welt.

Die für die AR wichtigste Visualisierungsart ist die *kongruente Überlagerung*, bei der die angezeigten virtuellen Informationen mit Objekten der realen Welt lagesynchron verknüpft sind. Dies kann entweder rein translatorisch erfolgen (3 Freiheitsgrade), sodass beispielsweise ein Hinweispfleil im Display statisch auf ein beliebig ausgerichtetes reales Objekt zeigt. Oder aber die Verknüpfung ist sowohl translatorisch als auch rotatorisch (6 Freiheitsgrade), sodass sein Hinweispfleil immer auf die gleiche Stelle an einem realen Objekt zeigt und sich somit bei Rotation des realen Objektes mitbewegen würde. Dadurch sind auch die virtuellen Objekte an die wahrgenommenen physikalischen Gegebenheiten der realen Objekte gekoppelt [YSC99]. Beim Einsatz der kongruenten

Überlagerung ist es neben der Erfassung der relativen Lage und Orientierung von Objekten der realen Welt zudem erforderlich, den Inhalt der Szene, in der sich der Anwender bewegt, zu kennen. Nur dadurch können die korrekten virtuellen Informationen mit der realen Welt kongruent verknüpft werden.

Im Gegensatz dazu steht die *nicht-kongruente Überlagerung*. Es handelt sich dabei um Darstellungen, welche nicht lagesynchron zu Elementen der realen Welt sind, aber im Unterschied zur **AV** einen Kontextbezug zu diesen haben. Es kann sich hierbei um Text- oder Grafikeinblendungen handeln, die einen Ortsbezug (z.B. textuell) haben können.

Welche Visualisierungsart am besten geeignet ist, muss spezifisch je konkretem Anwendungsfall entschieden werden. Die kongruente Visualisierung stellt mit Abstand die größten Herausforderungen an die Rechentechnik eines **AR**-System. Dabei muss zunächst die relative Position des Nutzers zu realen Objekten im Raum festgestellt werden. Dies geschieht durch das sogenannte *Tracking*. Anhand bestimmter Merkmale kann ein Sensor (Kamera, Magnetfeldsensor, o.ä.) feststellen, wo im Raum sich der Benutzer oder Objekte befinden.

#### **2.1.4 Mobilität der Systemelemente**

In einer **AR**-Anwendung werden virtuelle Informationen mit der realen Welt verknüpft. Einem Anwender kann diese erweiterte Realität auf verschiedenen Wegen dargeboten werden. Typisch für mobile **AR**-Systeme ist die Verwendung eines Head Mounted Displays (**HMDs**), aber auch andere Visualisierungsgeräte sind möglich. So können neben **HMDs** in der Hand mitgeführte Kleinrechner wie Personal Digital Assistants (**PDA**s), Ultra Mobile PCs (**UMPC**s) oder Laptops mit integrierter Kamera aber auch stationäre Monitore in Kombination mit einer beweglichen Kamera für eine **AR**-Visualisierung genutzt werden. Aus diesen Beispielen wird ersichtlich, dass hier eine Unterscheidung hinsichtlich der räumlichen Kopplung unterschiedlicher Systemelemente notwendig ist. Folgende wesentliche Komponenten sind für die Übermittlung von **AR**-Informationen zum Anwender erforderlich:

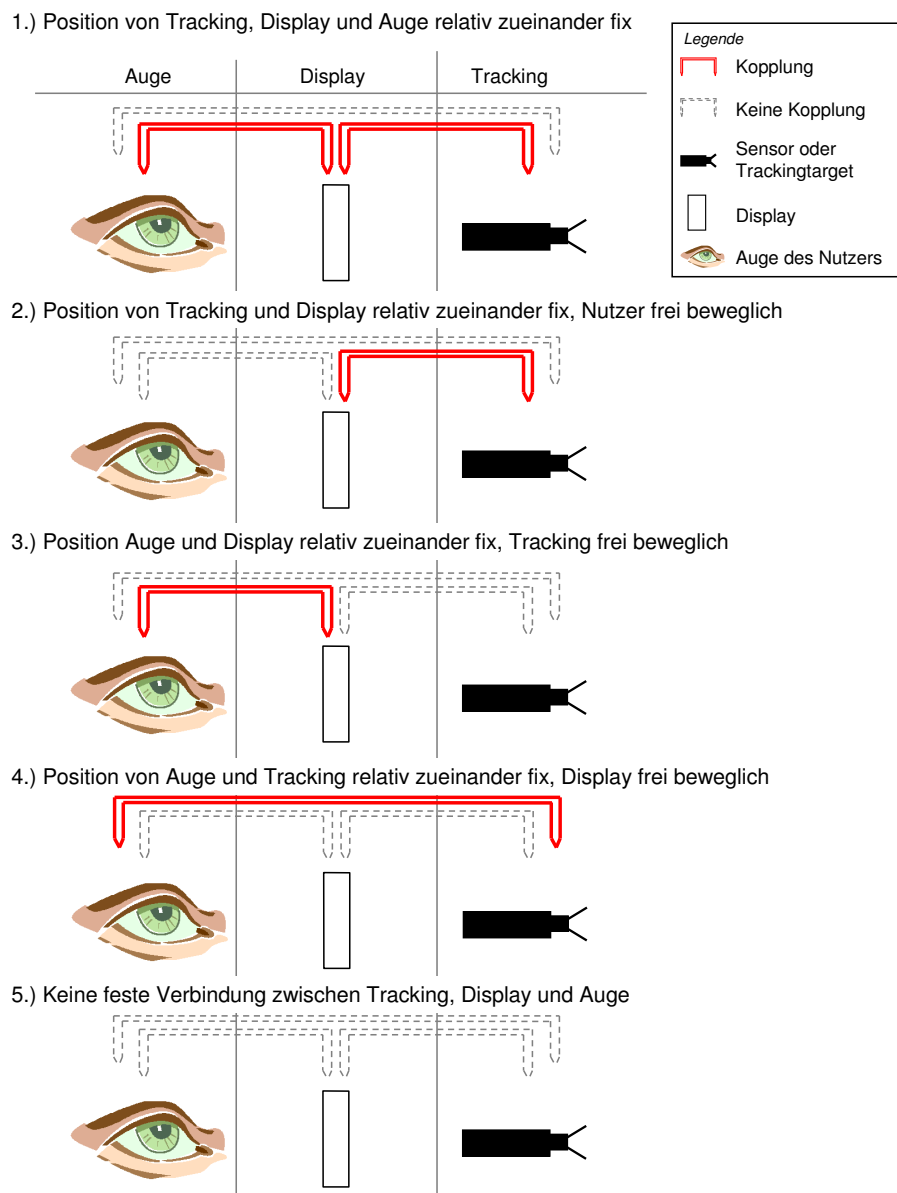
- *Menschliches Auge* für die Aufnahme der Informationen
- *Display* zur Visualisierung
- *Tracking* für das Bestimmen von Lage und Orientierung im Raum

Diese Komponenten können entweder miteinander fest verbunden („Kopplung“) oder zueinander frei im Raum beweglich sein („keine Kopplung“). Als „Tracking“ wird hier sowohl eine aktive (z.B. Kamera) als auch eine passive Komponente (z.B. Marker, Trackingtarget) des Trackingsystems angesehen, wobei im Fall einer Kopplung entweder die passive oder die aktive Komponente des Trackingsystems mit dem gekoppelten Element verbunden ist.

Abbildung 2.4 stellt Möglichkeiten der räumlichen Kopplung dar.

- 1.) Sind alle Elemente räumlich fest miteinander verbunden, so stellt dies eine typische **HMD**-Anwendung dar: Eine Kamera ist an einem **HMD** angebracht, welches der Nutzer an einer festen Position auf dem Kopf trägt. Das Display ist fixiert vor dem Auge des Nutzers, wodurch die **AR**-Einblendungen stets im selben Bereich des Sichtfeldes dargestellt werden. Dies dient zum Beispiel um kontinuierlich ablaufende Arbeitsschritte zu unterstützen.

Abbildung 2.4: Gekoppelte und ungekoppelte Systemkomponenten



Quelle: Eigener Entwurf

- 2.) Hält der Nutzer einen Kleinrechner mit integrierter Kamera in der Hand, so besteht zwar eine räumlich fixe Verbindung zwischen dem Rechner-Display und Sensor, jedoch kann dieser Rechner an beliebiger Stelle im Sichtfeld des Anwenders platziert werden. Diese hier „Handheld-AR“ genannte Möglichkeit, AR-Inhalte darzustellen, kann in Anwendungen genutzt werden, bei denen keine permanenten AR-Einblendungen notwendig sind.
- 3.) Die Kombination aus fest miteinander verbundenem Display und Auge, aber frei beweglichem Sensor, ist ebenfalls gebräuchlich. Eine Anwendungsmöglichkeit für diesen Fall stellen Umgebungen dar, bei denen Anwender permanent Prozessinformationen benötigen, wobei jedoch keine körperliche Anwesenheit des Anwenders möglich ist. Ein Beispiel dieser vergleichsweise ungewöhnlichen Anwendung stellt der Bereich der Produktion von radioaktiven Stoffen in abgeschirmten Handschuhboxen dar [REZ07].
- 4.) Systeme, bei denen das Tracking fest relativ zum Auge des Anwenders



ist, können dafür eingesetzt werden, die Sicht des Anwenders ständig auf einem andernorts aufgestellten Display zu visualisieren und um zusätzliche Informationen anzureichern. Ein möglicher Einsatzfall stellt das sogenannte „Remote-Expert“-Szenario dar. Eine Variante ist es hier, einem Servicetechniker eine Kamera am Helm anzubringen und bei Bedarf das Kamerabild an eine entfernte Steuerungszentrale zu übermitteln. Dort werden AR-Informationen auf dem Bild eingeblendet. Der Bearbeiter in der Zentrale kann so dem Servicetechniker per Telefon eine Rückmeldung geben, wie problematische Arbeitsschritte auszuführen sind.

- 5.) Eine weitere Möglichkeit besteht darin, alle Elemente voneinander zu trennen: Sowohl Auge als auch Display und Sensor sind räumlich zueinander frei beweglich. Foto- oder videobasierte Anwendungen („Monitor-AR“, siehe z.B. [PBDM07]) fallen in diese Kategorie, da zum Beispiel mit einer Fotokamera Fotos von einer beliebigen Stelle gemacht werden können, das Display zur Visualisierung beliebig platzierbar ist und der Anwender sich frei vor dem Display bewegt.

Beim Einsatz der Fälle 1 und 2 sind die Anwender mobil, während sie gleichzeitig mittels AR Informationen übermittelt bekommen. Die Fälle 3 bis 5 werden überwiegend in Anwendungen genutzt, bei denen Mobilität des AR-System zur Aufgabenerfüllung nicht erforderlich ist.

---

## 2.2 Mobile Augmented Reality

### 2.2.1 Definition und Abgrenzung

In Kapitel 2.1.4 wurde bereits angedeutet, dass allgemein in *stationäre* und *mobile* AR unterschieden werden kann [BTP08]. Während in der Literatur der Begriff „Augmented Reality“ weitestgehend fest definiert ist, existiert für die „mobile AR“ noch keine allgemeingültige Abgrenzung, sodass sich der dringende Bedarf nach einer eindeutigen Definition ergibt.

Allgemein bedeutet mobil „beweglich“ [Lan07], sodass keine feste Ortsbindung eines „mobilen Objektes“ besteht. Ist jedoch ein AR-System, welches aus Arbeitsplatzrechner und Monitor besteht und auf einem beweglichen Werkstattwagen montiert ist [Teg07], ein „mobiles AR-System“? Durch diese Fragestellung wird ersichtlich, dass der Aspekt der *Mitführbarkeit am Benutzer* hier eine besondere Bedeutung gewinnt.

Mobilität lässt sich in fünf Ebenen einteilen [Sch01, Sch05a]:

1. Mobilität der Person
2. Mobilität der Arbeit bzw. Arbeitsinhalte
3. Mobilität technischer Werkzeuge
4. Mobilität von Arbeitsbeziehungen  
(Kunde ↔ Auftragnehmer, Kollege ↔ Kollege)
5. virtuelle Mobilität

Für die Industrie bedeutet mobile AR, dass sowohl die Person [SB07] als auch das technische Werkzeug „AR“ frei beweglich sind [ABB<sup>+</sup>01], sodass keine die Arbeit behindernde Kabelverbindung zwischen mobilen und stationären Geräten besteht [TMX07]. Die AR-Technik muss jedoch nicht nur frei im Raum beweglich (*mobil*), sondern „am Benutzer mitführbar“ (*portabel*) sein.



Dies liegt darin begründet, dass die primäre Aufgabe des Nutzers in der Handhabung realer Objekte oft aus einer Bewegung heraus besteht, wobei er durch Informationen, die über nicht-stationäre portable Anzeigeräte bereitgestellt werden, von unproduktiven Handlungen entlastet wird [RBH03]. Es findet eine Zusammenführung der Realweltsicht, Tracking-Information und Computergrafik statt. Zur Generierung dieser Informationen werden Algorithmen verwendet, die einen handhabbaren Rechenaufwand erfordern und dennoch ein weiträumiges Tracking von Position und gegebenenfalls Orientierung bei hoher zeitlicher Auflösung [RJM<sup>+</sup>07] ermöglichen.

Insbesondere Systeme, bei denen

- Sensor, Display und Auge miteinander verbunden (Fall 1) oder
- Sensor und Display relativ zueinander fixiert aber zum Auge entkoppelt sind (Fall 2)

können für mobile AR-Systeme geeignet sein (vgl. Kapitel 2.1.4). Um eine lange Einsatzdauer zu ermöglichen, müssen besondere Kriterien hinsichtlich der Industrietauglichkeit erfüllt sein (vgl. Anhang A.1). So sollten die Geräte unter anderem über die Dauer eines kompletten Vollschiefeinsatzes (i.d.R. acht Stunden) funktionsfähig sein, ohne dass Batterien nachgeladen werden müssen.

Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit (Usability) dieser Systeme wurde erkannt, dass der Nutzer sie mit geringem Aufwand und bei einer möglichst geringen Aufmerksamkeit („wie beiläufig“) bedienen können muss [GRS03], da die Hauptaufgabe nicht in der Bedienung des AR-System sondern im Handhaben realer Objekte besteht. Gleichfalls darf das System die kognitiven Ressourcen des Anwenders nicht überfordern oder ihn in seiner Bewegungsfreiheit einschränken [RBH03]. Für einen Langzeiteinsatz sind daher ein geringes Gewicht, eine gute Schwerpunktage des HMDs und allgemein ein hoher Tagekomfort notwendig.

Aus diesen Eigenschaften und den allgemeinen Merkmalen der AR lässt sich folgende Definition ableiten:

**MOBILE AUGMENTED REALITY beschreibt die situationsgerechte Anzeige rechnergenerierter Informationen auf im Sichtfeld positionierten, vom Benutzer mitführbaren Anzeigegeräten, die die Bearbeitung primärer Arbeitsaufgaben nicht behindern.**

## 2.2.2 Mobiles Augmented Reality System

Ein mobiles AR-System stellt die Gesamtheit aller Soft- und Hardwareelemente dar, welche benötigt werden, um eine mobile AR-Anwendung zu erstellen. Um den Aspekten eines mobilen ARs-System gerecht zu werden, ist eine gesonderte Betrachtung der Hardwarekomponenten notwendig. Keines der am Anwender mitgeführten Geräte darf ihn behindern, da die Ausführung der primären Arbeitsaufgaben im Vordergrund steht.

Die Klasse der Eingabesysteme wird in zwei Kategorien unterteilt.

- Eingabesysteme unabhängig von einer Nutzerinteraktion geben Daten in das AR-System ein, ohne dass diese Dateneingabe bewusst vom Nutzer gesteuert oder kontrolliert wird.

- Eingabesysteme abhängig von einer Nutzerinteraktion bedürfen dem bewussten Wunsch eines Nutzers, Daten in das System einzugeben.

### **Eingabesysteme unabhängig von einer Nutzerinteraktion**

Eingabesysteme, die unabhängig von einer Nutzerinteraktion Daten in das AR-System einspeisen, sind für die mobile AR insbesondere die sogenannten Lokalisierungs- und Trackingsysteme. Als Lokalisierung wird hier die Ermittlung von Position und gegebenenfalls Orientierung eines Objektes bezeichnet, Tracking beschreibt das über die Zeit fortlaufend durchgeführte Lokalisieren.

Trackingsysteme werden hier explizit als *Eingaben* betrachtet, obwohl diese streng genommen ebenfalls Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe beinhalten. Die Ausgabewerte des Trackingsystems werden im AR-System als Eingaben genutzt.

Verschiedene Trackingverfahren, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden, bieten sich für den Einsatz in AR-Systemen an. Kriterien zur Differenzierung sind:

- *Genauigkeit*: Die Differenz zwischen tatsächlicher und gemessener Position bezeichnet man als Genauigkeit.
- *Auflösung*: Die Auflösung beschreibt die Unterteilung eines Messbereiches in vom Trackingsensor differenzierbare Elemente.
- *Latenzzeit*: Der zeitliche Versatz zwischen dem Erfassen eines Objekts und dem Erhalt der konkreten 3D-Daten wird als Latenzzeit beschrieben.
- *Updaterate*: Die Updaterate ist die Frequenz, mit der die 3D-Daten wiederholt ermittelt werden können.
- *Reichweite*: Der maximal mögliche Abstand zwischen zu erfassendem Objekt und Bildsensor wird als Reichweite bezeichnet.
- *Robustheit*: Die Robustheit ist ein Maß für die Störanfälligkeit des Gesamtsystems. Beispielsweise kann die Verdeckung von Elementen des Trackingsystems die Messergebnisse beeinflussen.
- *Umfang*: Der Umfang beschreibt die maximale Anzahl dedizierter Trackingdaten, die aus einem Satz Messgrößen gewonnen werden können.
- *Sichtlinie ja / nein*: Ob das Trackingsystem freie Sicht auf das zu erfassende Objekt benötigt, wird durch die Eigenschaft Sichtlinie beschrieben.
- *Freiheitsgrade*, engl. Degrees of Freedom (**DOF**): Freiheitsgrade kennzeichnen, wie viele Parameter ein Trackingsystem zu einem einzelnen Trackingobjekt bestimmen kann.<sup>1</sup>

Die Trackingverfahren können neben optischen auf elektromagnetischen, akustischen, mechanischen oder inertialen Sensoren basieren, die aktiv Signale aussenden oder diese passiv aufnehmen [Pfe08].

<sup>1</sup> Die translatorische Lage (Höhe, Breite, Länge) bedeutet **DOF** = 3; Translation und alle Orientierungsparameter bedeutet **DOF** = 3 + 3 = 6. Dies entspricht der „Pose“ eines Objektes [BMS98].

Neben diesen Methoden bestehen zudem verschiedene Tracking-Konzepte, die unterschiedliche Verfahren einsetzen. Es besteht die Möglichkeit, die Sensoren stationär zum Beispiel an einer Werkhallendecke anzubringen, während die zu erfassenden Objekte mobil sind („Outside-In“ Tracking). Ein umgekehrter Aufbau ist ebenfalls denkbar, sodass die Sensoren auf den bewegten Objekten montiert werden und dabei die stationäre Umgebung erfassen („Inside-Out“ Tracking, vgl. Kapitel 2.1.4). Inertiale Trackingsysteme, die auf Masseträgheit basieren (sogenannte Gyroskope und Akzelerometer), können beliebig am mobilen zu erfassendem Objekt angebracht werden und benötigen durch die überall vorhandene Masseträgheit keine freie „Sicht“ auf die Umgebung. Daher werden solche Systeme oft als „Inside-In“ Trackingsysteme bezeichnet, obwohl die korrekte Bezeichnung ebenfalls „Inside-Out“ lauten muss, da sie indirekt Parameter der stationären Umgebung erfassen.

Abbildung 2.5: Inertialsensoren mit optischer Drift-Korrektur



(a) Prototyp des Matris-Projektes



(b) IS-1200 VisTracker der Firma Intersense

Quelle: [MAT07], [Int08]

Eine Bewertung der Tauglichkeit einzelner Trackingsysteme muss für jeden Anwendungsfall separat geschehen. Während optische markerbasierte Systeme vergleichsweise preisgünstig sind, ist ihre Genauigkeit stark durch die verwendeten Kameras und die Updaterate wesentlich durch die genutzten Rechner beschränkt. Auf Akustik und Elektromagnetismus basierende Systeme sind vergleichsweise wenig robust, besonders bei bewegten beziehungsweise metallischen Objekten. Mechanische Trackingsysteme sind im Allgemeinen dadurch beschränkt, dass sie nur einen geringen Arbeitsraum abdecken, jedoch bieten sie eine sehr hohe Genauigkeit und Robustheit. Inertiale Systeme erfassen ausgehend von der Masseträgheit die Beschleunigung eines Objektes, sodass über eine doppelte Integration der Beschleunigung auf den zurückgelegten Weg geschlossen werden kann. Hierbei akkumulieren jedoch mit der Zeit Fehler („Drift“). Dies kann reduziert werden durch das Verwenden hybrider Trackingsysteme (Abbildung 2.5) und dem damit möglichen „Zurücksetzen“ der inertialen Abweichung.

Nicht immer ist eine korrekte Überlagerung erforderlich. Dies gilt besonders für Szenarien, bei denen ein hohes semantisches Verständnis aller Abläufe beim Nutzer vorliegt, so dass er auch bei einer fehlerhaften Überlagerung die Aufgabe korrekt ausführen kann [RM03]. Daher sollte je Anwendungsfall beurteilt werden, ob ein hochwertiges, hochgenaues Lokalisierungs- oder Trackingsystem tatsächlich erforderlich ist oder ob ein System mit geringerer Genauigkeit ausreicht.

## Eingabesysteme abhängig von einer Nutzerinteraktion

Die klassische Kategorie der IT-Eingabesysteme (Tastaturen, Computermaus) findet sich in miniaturisierten Varianten auch in der mobilen [AR](#) wieder. Für die Texteingabe können mini-Keyboards in Form von Unterarmtastaturen oder speziell angepassten Tastaturen<sup>2</sup> verwendet werden. Eine mögliche zukünftige Variante heutiger Eingabesysteme stellt die sogenannte „intelligenter Kleidung“ dar, bei der textile Tasten und Sensoren im Gewebe der Kleidung integriert sind. Mäuse existieren für die mobile [AR](#) als Miniaturgeräte in Form von Fingermäusen und dreh-drück-Tastern [[Ull06](#)]. Andere, für den Bereich der Augmented und Mixed Reality typische Eingabemethoden, stellen Datenhandschuhe und Spracheingabe dar. Besonders die Spracheingabe stellt hier eine zukunftsweisende Eingabemöglichkeit dar [[Fri04](#)], da heutige Mikrophone bereits extrem klein sind und ohne den Anwender zu stören an der Kleidung angebracht werden können. Hier sind jedoch je nach Anwendung industrielle Störgeräusche zu berücksichtigen, die den Einsatz einer Spracheingabe verhindern können.

Weiterhin ergibt sich durch das Vorhandensein eines Trackingsystems die Möglichkeit für den Nutzer, dieses ebenfalls bewusst als Eingabesystem zu nutzen. Bei Verwendung eines optischen Trackingsystems kann ein Anwender bestimmte Objekte ins Kamerabild halten oder mit definierten Bewegungen im Kamerabild schwenken, sodass sich dies als Eingabemetapher auswerten lässt [[WLF07](#)]. Gleiches ist in abgewandelter Form mit anderen Trackingsystemen ebenfalls möglich.

## Verarbeitungssysteme

Die Verarbeitungssysteme mobiler [AR](#) werden in dieser Arbeit in die Klassen „stationär“, „mobil“ und „hybrid“ eingeteilt.

Stationäre Verarbeitungssysteme stellen Computer dar, die an einem festen Ort verweilen. Alle Eingabe- und Ausgabesysteme sind kabellos damit verbunden, sodass gewährt ist, dass der Nutzer sich gemäß der Definition mobiler [AR](#) frei bewegen kann. Dies hat den Vorteil, dass die hohe Rechenleistung regulärer stationärer Computer nutzbar ist und kein zusätzliches Gewicht durch mobile Rechentechnik am Anwender mitgeführt wird. Da jedoch drahtlose Verbindungen anfällig für Störsignale und Umwelteinflüsse sein können, muss sichergestellt sein, dass jederzeit eine stabile Übertragung möglich ist. Ein solches System wurde in einer Vorarbeiten der vorliegenden Arbeit eingesetzt [[Tüm06](#)].

Mobile Verarbeitungssysteme sind tragbare Kleinstrechner, die der Nutzer mit sich führt, ohne sie als störend wahrzunehmen. Bisher haben diese Systeme eine deutlich geringere Rechenleistung als stationäre, da bei deren Gestaltung ein Kompromiss zwischen Geräteergonomie (Größe, Gewicht), Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit getroffen werden muss. In einer von Wagner et al. beschriebenen Arbeit wird als mobiles Verarbeitungssystem ein [PDA](#) verwendet, der alle Berechnungen von der Bildaufnahme bis zur Visualisierung in ausreichender Geschwindigkeit durchführt [[WPS04](#)]. Diese und weitere Arbeiten wurden bis heute konsequent fortgeführt, sodass heute abhängig vom Gerät und den dargestellten Inhalten typische Bildwiederholraten zwischen 5 bis 30 Bildern pro Sekunde liegen [[SW08](#)].

---

<sup>2</sup> z.B. „Handykey Twiddler“, [www.handykey.com](http://www.handykey.com)

Hybride Verarbeitungssysteme verbinden die Vorteile beider zuvor genannter Systeme miteinander: Es werden sowohl mobile als auch stationäre Rechner genutzt. Rechenaufwendige Algorithmen können stationär ausgeführt werden, während auf dem mobilen Gerät einfachere Algorithmen ablaufen. Durch eine drahtlose Synchronisation der mobilen Algorithmen mit den Ergebnissen der rechenaufwendigeren stationären Algorithmen kann somit die heute noch bestehende Lücke der geringen mobilen Rechenleistung teilweise überbrückt werden.

Besonders die kongruente Überlagerung stellt große Herausforderungen an die Rechenleistung der verwendeten Verarbeitungssysteme. Schmalstieg beschreibt hierfür unter anderem folgende Anforderungen an mobile Verarbeitungssysteme [Sch09]:

- Echtzeitvisualisierung bei mindestens der Bildwiederholrate der verwendeten Kamera (>15 Hz)
- 6D Registrierung: Überlagerung mit sechs Freiheitsgraden, nicht einfach Zeichnen von 2D-Informationen ins Videobild
- Keine unpassenden algorithmischen Vereinfachungen (z.B. nur langsame Bewegungen des Nutzers zulassen)
- Evaluierung mit den späteren tatsächlichen Benutzern

Diese Anforderungen gelten jedoch nicht nur für mobile Verarbeitungssysteme sondern sind auch auf stationäre und hybride übertragbar.

Der Trend mobiler Verarbeitungssysteme geht hin zu leistungsfähigen mobilen (Grafik-) Prozessoren wie dem „nVidia Tegra“<sup>3</sup>, sodass zukünftig damit zu rechnen ist, dass mobile Verarbeitungssysteme ausreichende Rechenleistung für mobile AR bereitstellen.

### **Ausgabesysteme**

Die Ausgabe von AR-Informationen kann über unterschiedliche Visualisierungssysteme geschehen. An dieser Stelle soll auf *am Benutzer mitführbare* Ausgabesysteme eingegangen werden.

Für die visuelle Ausgabe von Informationen können beispielsweise HMDs genutzt werden. Hierbei werden, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, die AR-Inhalte durch Visualisierungstechniken dargestellt, die das anzuzeigende Bild nahe am Auge einblenden. Da diese Ausgabeform in der vorliegenden Arbeit besonders im Vordergrund steht, wird in Kapitel 4.4.2 gesondert darauf eingegangen.

Weitere Formen von Ausgabesystemen mobiler AR können am Unterarm getragene Monitore, Micro-Beamer oder PDAs sein, die der Anwender bei Bedarf im Sichtfeld positioniert [Boy09]. Aktuelle Entwicklungen solcher Kleinstdisplays<sup>4</sup> zeigen immer leichtere und sogar flexible Modelle [Bur06]. Es ist daher zu erwarten, dass diese Displays mittelfristig industriell eingesetzt werden.

Neben den optischen / visuellen Ausgabemitteln existieren weitere Möglichkeiten, Informationen situationsgerecht zum Anwender zu transportieren (zum

<sup>3</sup> [http://www.nvidia.de/object/product\\_tegra\\_600\\_de.html](http://www.nvidia.de/object/product_tegra_600_de.html)

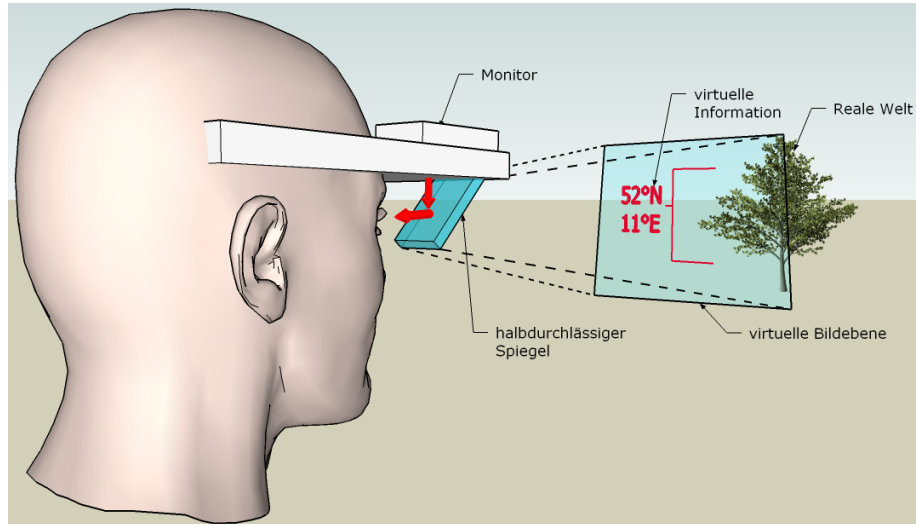
<sup>4</sup> gemeint sind hier nicht HMDs

Beispiel akustische Ausgaben). Auf diese soll jedoch an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da die visuellen Ausgabeformen im Vordergrund der vorliegenden Arbeit stehen.

### 2.2.3 Visualisierungstechniken mobiler AR-Systeme

Die Visualisierungstechniken heutiger mobiler AR-Systeme können allgemein in die Kategorien Optical See-Through (OST), Projection See-Through (PST), Video See-Through (VST), LookAround und Handheld unterschieden werden.

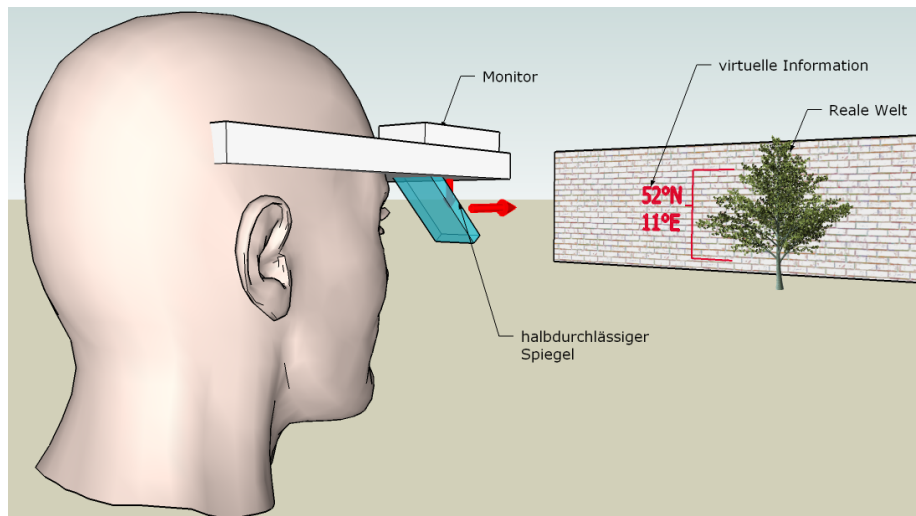
Abbildung 2.6: Optical See-Through (OST)



Quelle: Eigener Entwurf nach [Alt02]

Beim OST (Abbildung 2.6) wird dem Anwender die Sicht auf die Umgebung fast wie gewohnt gewährt: Dem Nutzer eines OST-HMDs werden ausschließlich die zusätzlichen virtuellen Elemente über einen halb transparenten Spiegel eingeblendet, während gleichzeitig die Sicht auf die reale Umwelt kaum eingeschränkt wird. Dadurch ermöglicht OST einen sehr hohen Grad der Immersion („Eintauchen des Nutzers“). Der augmentierbare Bereich entspricht dem Sichtfeld des HMDs. Durch diese Art der Visualisierungstechnik ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, welche die lagerichtige Verknüpfung der virtuellen Einblendung mit der realen Welt betreffen (vgl. Kapitel 2.2.4).

Abbildung 2.7: Projection See-Through (PST)



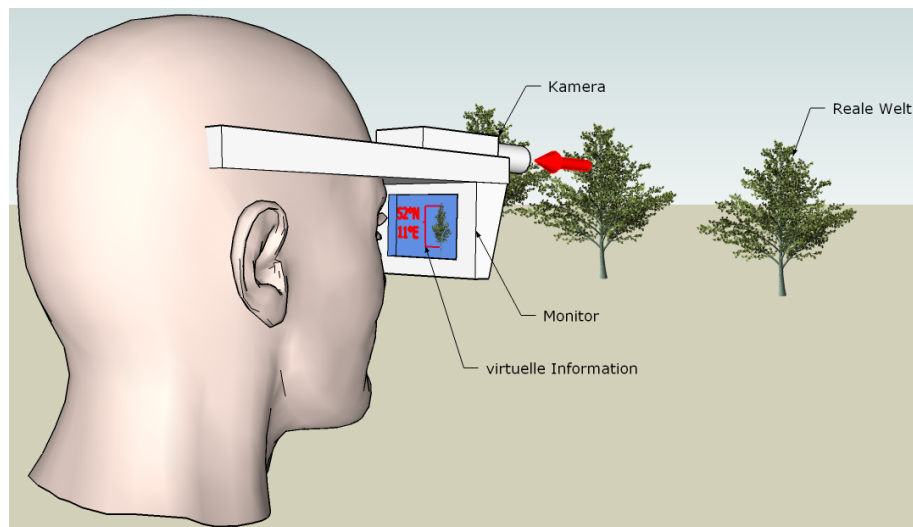
Quelle: Eigener Entwurf

Eine Alternative zur OST-Visualisierungstechnik ist die vergleichsweise neue



und bisher wenig beschriebene **PST** (Abbildung 2.7). Die Sicht auf die Umwelt wird dem Anwender wie bei der **OST** gewährt, jedoch projiziert das **HMD** nicht direkt ins Auge, sondern auf Objekte der realen Umgebung. Der augmentierbare Bereich entspricht dem Projektionsbereich (Reichweite, Öffnungswinkel) des Monitors / Projektors. Hier ergeben sich Herausforderungen dahingehend, dass stets nahe stehende, Licht reflektierende, jedoch nicht spiegelnde Objekte verfügbar sein müssen, auf die projiziert werden kann [Hua03]. Verschiedene Oberflächentexturen erschweren das Erkennen des projizierten Bildes. Aufgrund der erst sehr kurzen Verfügbarkeit solcher Displays und der bisher geringen Zahl abgeschlossener Untersuchungen zu Anwendungen mobiler **PST** wird der Einsatz dieser Visualisierungstechnik in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Abbildung 2.8: Video See-Through (VST)

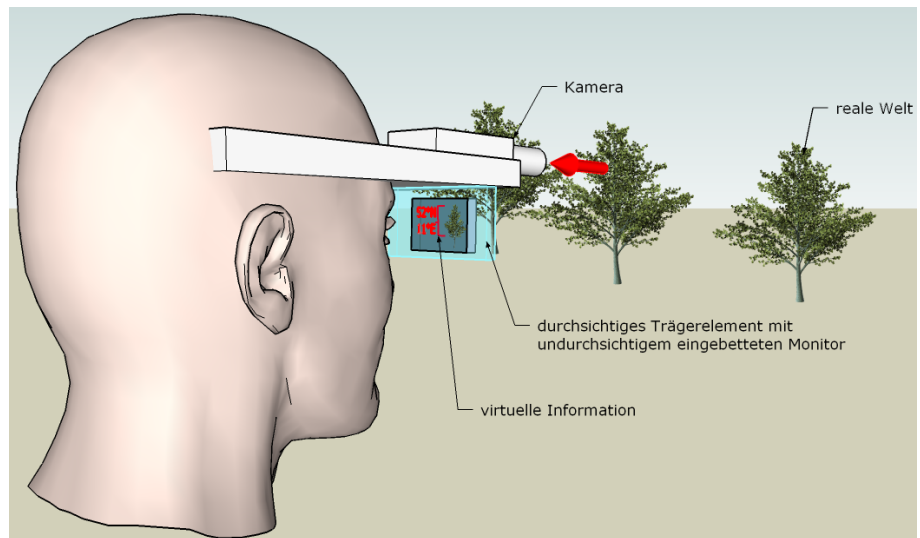


Quelle: Eigener Entwurf nach [Alt02]

Beim **VST** (Abbildung 2.8) nimmt eine am Nutzer oder am Display angebrachte Videokamera das Bild der Umgebung des Nutzers auf. Dieses wird durch einen Computer verarbeitet um daraus ein neues, durch zusätzliche virtuelle Einblendungen angereichertes Bild zu generieren. Das neue Bild wird durch einen Monitor im Sichtfeld des Anwenders ausgegeben, sodass das Sichtfeld des Anwenders auf die reale Welt dem Sichtfeld der Kamera entspricht und durch die Eigenschaften von Kamera und Display sowie durch die Positionierung der Kamera beschränkt ist. Dies führt im Allgemeinen zur Beeinträchtigung der Hand-Augen-Koordination des Anwenders [BR98], was aus Gründen der Arbeitssicherheit in industriellen Einsatzbereichen inakzeptabel ist.

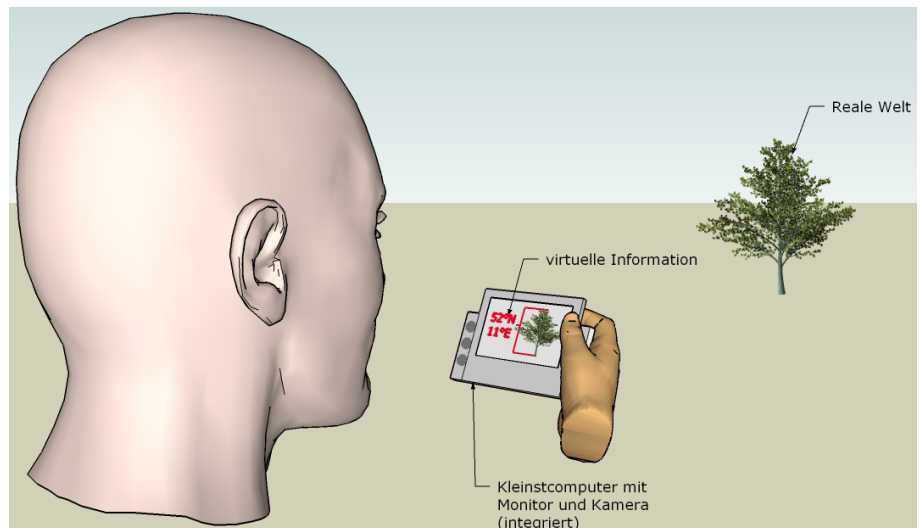
Eine Variante der **VST** wird als „LookAround“ [Alt02] bezeichnet (Abbildung 2.9). Dabei werden **HMDs** eingesetzt, die im Gegensatz zur **VST** die Sicht auf die Umwelt teilweise gewähren. Dies wird durch die Kombination eines undurchsichtigen Monitorelements mit einem transparenten, den Monitor umgebenden Element realisiert. Durch den Einsatz von LookAround Displays kann somit auf die zuvor hingewiesene Problematik der Hand-Augen-Koordination von herkömmlichen **VST**-Displays umgangen werden. Damit für einen industriellen Einsatz eine möglichst gute Sicht auf die Umwelt gewährt wird, sind die in Look-Around-HMDs genutzten Monitorelemente relativ klein. Detailreiche **AR**-Einblendungen sind daher ungeeignet, weswegen sich die LookAround Visualisierungstechnik insbesondere für Einsatzfälle eignet, bei denen keine kongruente Überlagerung erforderlich ist (wenige **AR**-Inhalte, Texteinblendung).

Abbildung 2.9: LookAround



Quelle: Eigener Entwurf

Abbildung 2.10: Handheld



Quelle: Eigener Entwurf

Eine weitere Variation der VST stellt „Handheld-AR“ dar (Abbildung 2.10). Hier werden Displaysysteme eingesetzt, die der Anwender in seiner Hand tragen und bei Bedarf im Sichtfeld positionieren kann, wobei Bilder einer am Display fest angebrachten Kamera für die Darstellung der AR-Inhalte genutzt werden (z.B. PDA oder UMPC).

Für die beschriebenen Visualisierungstechniken ist offensichtlich, dass aktuell mindestens drei nicht für einen industriellen Einsatz geeignet sind. Die PST scheidet aufgrund des bisher ungenügenden Forschungsstandes aus. Herkömmliche VST-Systeme sind ungeeignet, da die Sicht auf die reale Welt zu stark eingeschränkt ist und somit die Arbeitssicherheit gefährdet sein kann. Da beim Einsatz von Handheld-AR (mindestens) eine Hand des Nutzers nicht zur Ausführung der Arbeitsaufgabe zur Verfügung steht, wird auch dieses Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit nicht näher betrachtet.

Für die Visualisierungstechniken OST und LookAround ist eine detailliertere Bewertung der Eignung für den industriellen Einsatz erforderlich (Tabelle 2.1). OST-Systeme bieten die bestmögliche Sicht auf die Realwelt. Sie wird so durch den Benutzer wahrgenommen, wie sie tatsächlich existiert, da OST-HMDs ähnlich wie eine normale Sehhilfe getragen werden und kaum die Sicht



Tabelle 2.1: Gegenüberstellung von OST und LookAround

	Optical-See-Through		LookAround	
Großes Sichtfeld des AR-Displays möglich?	+	ja	-	Nein, darf prinzipbedingt nicht zu groß sein, sonst zu viel Verdeckung
Sicht auf reale Welt	+	kaum Behinderung	-	verändert durch im Sichtfeld platzierten Monitor, Kameraparameter und unterschiedliche Raumposition Auge / Kamera
Hand-Augen-Koordination	+	kaum Beeinträchtigung (ähnlich „Brille“)	-	vorübergehender Verlust der Hand-Augen-Koordination möglich [BR98]
Anforderungen an lagerichtige Einblendung	-	hohe Anforderungen, See-Through-Kalibrierung notwendig	+	einfach, direktes Arbeiten auf Kamera-Bilddaten
Latenz beim Wahrnehmen der realen Welt	+	keine	o	keine außerhalb des Displays aber Verzögerung im Displaybild durch Aufnahmezeit der Kamera und Leistung AR-Rechner
Latenz zwischen real und virtuell	-	ist möglich je nach Leistung der AR-Rechner	+	keine, da beides im Displaybild
Fokal- / Wahrnehmungsebenen	-	Darstellung AR meist auf anderer Fokalebene als Umwelt	o	Displaybild vereint Kamerabild und AR-Einblendung auf einer Ebene, aber Fokuswechsel notwendig, wenn Blick „am Display vorbei“ auf Umwelt

des Anwenders beschränken. Ein LookAround Display verdeckt einen Teil des Sichtfeldes mindestens eines Auges, da ein Teil des Displays nicht transparent ist. LookAround-Displays sind daher relativ klein, um nicht zu viel vom Sichtfeld des Anwenders zu verdecken. Aus diesem Grund können im Gegensatz zu OST-Displays nur wenige Informationen dargestellt werden. Wenn ähnlich zur herkömmlichen VST Bilder einer Kamera im LookAround-Display dargestellt werden, wird durch die Kameraaufnahme und die Displayeigenschaften der Detailgrad der realen Szene reduziert und es besteht die Gefahr eines vorübergehenden Verlustes der Hand-Augen-Koordination [BR98]. Dies kann durch eine zeitverzögerte und möglicherweise verzerrte Darstellung des Kamerabildes verstärkt werden; dieses Problem besteht bei OST nicht. Systeme, die LookAround-Displays einsetzen, haben den Vorteil, dass die virtuellen Informationen direkt auf dem Videobild der Kamera angezeigt werden. Wird ein OST-System benutzt, entsteht hingegen das Problem, dass die Sicht des Nutzers auf die Umgebung im Allgemeinen nicht der Sicht des Tracking-Sensors (z.B. Kamera) entspricht. Somit ist eine zusätzliche Transformation zwischen den Koordinatensystemen der Kamera und des Displays / Auges notwendig, die als „See-Through-Kalibrierung“ (siehe Kapitel 2.2.4) bezeichnet wird. Für die Problematik der Latenz kann in zwei Bereiche unterschieden werden: Einerseits könnte die Wahrnehmung der Realität verzögert sein. Dies ist teilweise bei LookAround möglich, da das um AR-Inhalte erweiterte Kamerabild bedingt durch die eingesetzten mobilen Verarbeitungssysteme zeitverzögert auf dem Display dargestellt werden kann. Da jedoch LookAround Displays eine teilweise natürliche Sicht auf die Umwelt ermöglichen, ist dies weniger kritisch. Andererseits kann bei OST-Systemen eine Latenz zwischen realen und virtuellen Elementen entstehen, wenn das Verarbeitungssystem die AR-Inhalte nicht schnell bezogen auf die Realität aktualisieren kann. Heutige OST-Systeme blenden die AR-Informationen üblicherweise auf einer festen Fokalebene ein (vgl. Anhang A.5), die nicht dynamisch an die aktuelle Fokalebene der Augen angepasst wird. Dies gilt es, zukünftig zu verbessern [HUD<sup>+</sup>08]. Bei LookAround Displays wird zwar die AR-Einblendung mit dem Kamerabild auf einer Fokalebene dargestellt, jedoch muss der Benutzer beim Blick auf die Realwelt durch die transparenten Bereiche des HMD zwischen dem AR-Display und der realen Umwelt umfokussieren.

Aus der zuvor beschriebenen Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass sowohl LookAround als auch OST Vorteile in verschiedenen Bereichen haben. Insbesondere die „Sicht auf die Realwelt“ stellt einen wichtigen Faktor für industrielle Bereiche dar. Bei LookAround Systemen wird diese teilweise eingeschränkt. Weiterhin ist der augmentierbare Bereich des Sichtfeldes des Anwenders beim LookAround vergleichsweise klein, so dass solche Systeme überwiegend nur zur Darstellung nicht-kongruenter AR-Inhalte genutzt werden sollte.

Für den in der vorliegenden Arbeit angestrebten Einsatzfall sind kongruente Überlagerungen erforderlich. Daher wird im weiteren Verlauf der Einsatz von Optical See-Through HMDs beschrieben.

#### 2.2.4 See-Through-Kalibrierung

Damit beim Einsatz eines OST-HMDs eine kongruente Visualisierung entstehen kann, muss beim Tracking folgendes berücksichtigt werden: Die Messgrößen, die der Trackingsensor aufnimmt, können nicht ohne Aufbereitung für die Erstellung der Visualisierung verwendet werden. Wird beispielsweise

Abbildung 2.11: Unterschiedliche Aufnahme der Umwelt bei Sensor (Kamera) und Nutzer

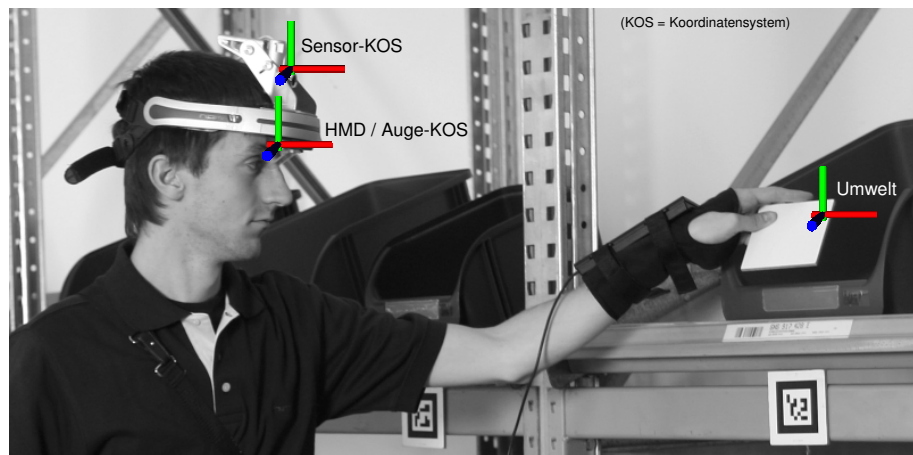


Foto: Dirk Mahler / Fraunhofer IFF

ein optisches Tracking benutzt, bei dem eine Kamera an einem HMD angebracht ist, so stimmt das Bild der Tracking-Kamera nicht mit dem Bild überein, welches der Nutzer durch das HMD über die Augen wahrnimmt. Die 2D-Abbildungen im Kamerabild und im Auge unterscheiden sich zum Beispiel durch die unterschiedliche Lage und Orientierung von Auge und Sensor (siehe Abbildung 2.11). Tuceryan und Navab vergleichen mit dem Bereich der Kamerakalibrierung und sprechen davon, dass hier die Lage der *realen Kamera* (z.B. am HMD) nicht mit der Lage der *virtuellen Kamera* (entspricht Sicht des Nutzers auf die Umwelt) übereinstimmt [TGN02].

Die See-Through-Kalibrierung (STK) dient dazu, die Koordinaten von Objekten im Sensor-Koordinatensystem ins Displaykoordinatensystem zu überführen. Ohne diese Registrierung der virtuellen Daten mit der realen Welt würde die kongruente Überlagerung nicht möglich sein und der Nutzer könnte nur schwer einen Bezug zwischen den virtuellen und realen Objekten erkennen [RM03]. Ein Arbeiten ohne STK wäre nur möglich, wenn das Trackingsystem direkt in der Sichtachse liegt [LRWP05]. Dies gilt sowohl für monokulare (ein Display vor einem Auge) als auch für binokulare (je Auge ein separates Display) OST-HMDs. Im Fall von binokularen Displays wird jedes Auge einzeln kalibriert. Da jedoch bisher keine wirtschaftlich einsetzbaren binokularen Displays verfügbar sind (siehe Anhang A.5), werden diese im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet. Biokulare OST-HMDs (beide Augen nutzen dasselbe Display) können mit Hilfe der See-Through-Kalibrierung nicht kalibriert werden, da eine STK eines Auges auf Grund der unterschiedlichen Position der Augen relativ zur Kamera nicht gültig für das zweite Auge ist. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird im Zusammenhang mit der STK somit nur auf monokulare Systeme eingegangen, die beschriebenen Verfahren sind jedoch auch auf binokulare übertragbar, wenn für jedes Auge eine separate Kalibrierung durchgeführt wird.

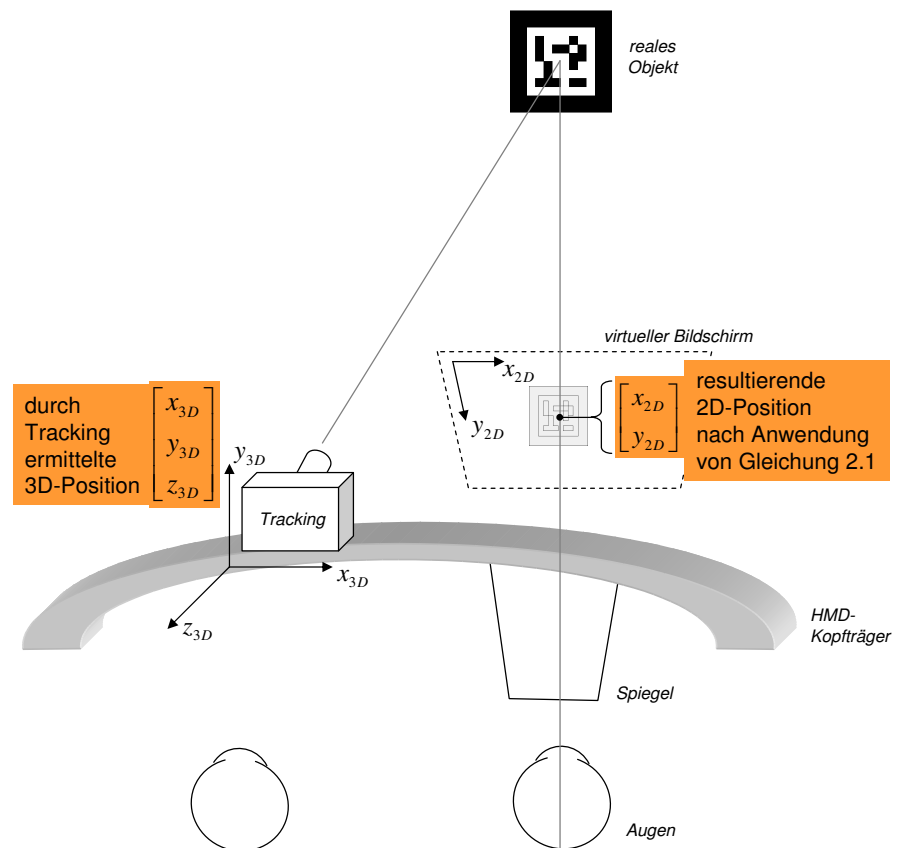
Üblicherweise sind der genutzte Trackingsensor und das Display fest miteinander verbunden. Um einen geringen Versatz zwischen virtueller Einblendung und realem Objekt und somit eine gute Überlagerungsgenauigkeit zu gewährleisten, muss die STK immer dann neu ausgeführt werden, wenn sich die Position bzw. Orientierung des Sensors zum Display oder die Orientierung des Displays zum Auge ändert. Soll ein mobiles OST-HMD-System im industriellen Einsatz genutzt werden, muss bei jedem erneuten Aufsetzen des HMDs eine Kalibrierung durchgeführt werden, um eine exakte Überlagerung zu garantieren. Da auch ein Verrutschen des HMDs nicht unwahrscheinlich ist, muss

ein fester Sitz des **HMDs** gewährleistet sein. Dieser feste Sitz ist bei bisherigen **HMDs** nicht garantiert, sodass es häufig zu Relativbewegungen zwischen Display, Kamera und Auge des Anwenders kommen kann. Da eine neue Durchführung der Kalibrierung somit häufig erforderlich wird und die See-Through-Kalibrierung zudem eine nicht-produktive Tätigkeit darstellt, muss sie für den Einsatz in der Industrie möglichst einfach und schnell für die Anwender handhabbar sein. Dies stellt eine der wesentlichen Herausforderungen für heutige auf **OST-HMDs** basierende mobile **AR-Systeme** dar.

### Mathematische Problemstellung

Durch ein Augmented Reality System werden reale Objekte mit virtuellen Informationen verknüpft. Heute übliche **AR-Systeme** verwenden unter anderem optische Trackingverfahren, bei denen eine am **HMD** befestigte Kamera die Umgebung erfasst und Tracking-Marker für die Ermittlung der 3D-Raumposition nutzt [TSBM08]. Dabei müssen beim Einsatz von **OST-HMDs** die unterschiedlichen Parameter sowie der Versatz zwischen Display und Trackingsensor berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.2.4).

Abbildung 2.12: 3D-Raumkoordinaten vom Tracking-system und 2D-Bildschirmkoordinaten im **HMD**



Quelle: Eigener Entwurf

Durch das Trackingsystem werden 3D-Daten ermittelt, welche die Lage und / oder Orientierung eines Objektes in der realen Welt beschreiben. Da sich die ermittelten Werte auf die Pose des Trackingsensors beziehen, muss eine Transformation in Displaykoordinaten erfolgen, sodass die relative Lage und Orientierung des Trackingsensors zum Auge des Nutzers berücksichtigt wird (Abbildung 2.12).

Die Überführung von 3D-Koordinaten ( $x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}$ ) eines realen Objektes in 2D-Bildkoordinaten ( $x_{2D}, y_{2D}$ ) kann unter der Annahme einer projektiven Abbildung durch Multiplikation mit einer Projektionsmatrix  $P$  geschehen

[Luh03] (Gleichung 2.1), das Ziel der See-Through-Kalibrierung ist somit die Ermittlung dieser Projektionsmatrix.

$$\begin{bmatrix} x_{2D} \\ y_{2D} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{bmatrix} x_{3D} \\ y_{3D} \\ z_{3D} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \\ p_9 & p_{10} & p_{11} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Die Projektionsmatrix  $P$  kann in Parameter der inneren (u.a. Bildhauptpunkt  $[x'_h, y'_h]$ , Kamerakonstante  $[c_x, c_y]$ , Scherung  $[s]$ ) und äußeren (Pose der „Kamera“ bestehend aus Translation  $[t_i]$  und Rotation  $[r_{ij}]$ ) Orientierung zerlegt werden [Mor02, Luh03]:

$$P = \begin{bmatrix} c_x & s & x'_h \\ 0 & c_y & y'_h \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Zur Ermittlung aller Parameter in  $P$  kann gemäß Gleichung 2.1 das Verfahren der Direkten Linearen Transformation (DLT) eingesetzt werden [TGN02]. Weitere Möglichkeiten basieren darauf, nach einer initialen Kalibrierung die Projektionsmatrix  $P$  zu verändern und somit den Aufwand einer Neukalibrierung zu verringern [GTN02]. Diese Verfahren werden nachfolgend beschrieben.

### Direkte Lineare Transformation

Eine Möglichkeit, die Parameter der Projektionsmatrix  $P$  direkt zu ermitteln, stellt die Direkte Lineare Transformation dar, dies wurde für die See-Through-Kalibrierung erfolgreich im sogenannten „SPAAM“-Verfahren umgesetzt [TGN02] und ist heute als wesentliches Verfahren etabliert [SK08].

Gemäß Gleichung 2.1 lassen sich die 2D-Koordinaten im HMD folgendermaßen bestimmen:

$$x_{2D} = p_1 x_{3D} + p_2 y_{3D} + p_3 z_{3D} + p_4 - x_{2D} p_9 x_{3D} - x_{2D} p_{10} y_{3D} - x_{2D} p_{11} z_{3D}$$

$$y_{2D} = p_5 x_{3D} + p_6 y_{3D} + p_7 z_{3D} + p_8 - y_{2D} p_9 x_{3D} - y_{2D} p_{10} y_{3D} - y_{2D} p_{11} z_{3D} \quad (2.4)$$

Die Elemente  $p_i$  der Matrix  $P$  können hier als Vektor  $\vec{p} = (p_1 \dots p_{11})^T$  aufgefasst und gemäß Gleichung 2.4 durch mindestens 11 Gleichungen für  $x_{2D}$  und  $y_{2D}$  ermittelt werden. Für die hier beschriebene STK werden sechs 3D-Raumpositionen  $(x_{3D}, y_{3D}, z_{3D})$ , sowie die zugehörigen sechs 2D-Displaypositionen  $(x_{2D}, y_{2D})$  genutzt, sodass ein überbestimmtes Gleichungssystem entsteht. Nach Umformung ergibt sich aus Gleichung 2.4 folgendes Gleichungssystem (Gleichung 2.5 und 2.6):

$$\vec{v}_{2D} = \begin{bmatrix} x_{2D_1} \\ y_{2D_1} \\ \vdots \\ x_{2D_6} \\ y_{2D_6} \end{bmatrix} = A \cdot \vec{p} \quad (2.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_{3D_1} & y_{3D_1} & z_{3D_1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{2D_1}x_{3D_1} & -x_{2D_1}y_{3D_1} & -x_{2D_1}z_{3D_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{3D_1} & y_{3D_1} & z_{3D_1} & 1 & -y_{2D_1}x_{3D_1} & -y_{2D_1}y_{3D_1} & -y_{2D_1}z_{3D_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{3D_6} & y_{3D_6} & z_{3D_6} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{2D_6}x_{3D_6} & -x_{2D_6}y_{3D_6} & -x_{2D_6}z_{3D_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{3D_6} & y_{3D_6} & z_{3D_6} & 1 & -y_{2D_6}x_{3D_6} & -y_{2D_6}y_{3D_6} & -y_{2D_6}z_{3D_6} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Suthau schlägt vor,  $\vec{p}$  mithilfe der Moore-Penrose Pseudo-Inversen zu ermitteln (Gleichung 2.7) [Sut06]. Dieses Verfahren ist jedoch numerisch sehr instabil und kann somit zu falschen Ergebnissen führen [Rüd05].

$$\vec{p} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{v}_{2D} \quad (2.7)$$

Eine weitere Lösungsmöglichkeit basiert auf dem Einsatz der Singulärwertzerlegung [HZ04]: Die Singulärwertzerlegung einer Matrix bezeichnet deren Darstellung als Produkt dreier spezieller Matrizen, aus denen man bestimmte Eigenschaften der Matrix ablesen kann [Her01]. Bei diesem Verfahren wird eine Matrix  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  in die orthogonalen Matrizen  $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$  und  $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$  sowie der Diagonalmatrix  $\Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}$  zerlegt (Gleichung 2.8):

$$A = U \Sigma V^T \quad (2.8)$$

Durch folgende Operationen kann somit  $\vec{p}$  ermittelt werden:

$$\vec{v}_{2D}' = U^T \cdot \vec{v}_{2D} \quad (2.9)$$

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} \frac{v_{2D_1}'}{\Sigma_{1,1}} \\ \vdots \\ \frac{v_{2D_i}'}{\Sigma_{i,i}} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\vec{p} = V \cdot \vec{y} \quad (2.11)$$

Da die Singulärwertzerlegung weniger anfällig für numerische Instabilität ist, sollte sie unbedingt der Moore-Penrose-Pseudoinversen vorgezogen werden. Dennoch muss überprüft werden, ob Elemente aus  $\Sigma$  nahe an Null liegen. Falls dieser Fall eintritt, wird das jeweilige  $y_i = 0$  gesetzt.

Die resultierende Projektionsmatrix kann nun genutzt werden, um gemäß Gleichung 2.1 jeden beliebigen 3D-Punkt in einen 2D-Bildpunkt zu überführen.

### Ermittlung einer zweiten Transformationsmatrix

Genc et al. beschreiben ein Verfahren, bei dem angenommen wird, dass sich nach einmaliger Kalibrierung (Kapitel 2.2.4) und späterem erneuten Ab- / Aufsetzen des HMDs nur Parameter der Translation und Skalierung bei der selben Person ändern [GTN02]. Dieses wird als „SPAAM2“ oder „SPAAM+“ bezeichnet und ist heute ebenfalls gebräuchlich.

Zunächst wird durch eine initiale Kalibrierung die in Kapitel 2.2.4 beschriebene Kalibrierprozedur ausgeführt und  $P$  ermittelt. Beim späteren erneuten Aufsetzen des HMDs kann der Anwender diese Kalibrierung erneut laden und führt dann eine zusätzliche Nachkalibrierung durch. Dabei wird jedoch nicht die gesamte Projektionsmatrix neu berechnet, sondern eine zusätzliche Matrix  $N$  bestimmt:

$$\begin{bmatrix} x_{2D} \\ y_{2D} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{N} \cdot P \cdot \begin{bmatrix} x_{3D} \\ y_{3D} \\ z_{3D} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} sc_x & 0 & d_x \\ 0 & sc_y & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Für die Ermittlung der vier Unbekannten (Skalierung  $\mathbf{sc}$  und Translation  $\mathbf{d}$ ) werden vier Gleichungen benötigt, die durch den Einsatz zweier 2D-2D-Punktkorrespondenzen aufgestellt werden können. Eine Erweiterung auf einen Scherungsparameter wird durch Genc et al. ebenfalls beschrieben [GTN02] und macht für die Berechnung die Einbeziehung eines dritten Punktes zur Ermittlung von  $N$  erforderlich.

### Normierung der Eingabewerte

Zur Ermittlung einer möglichst korrekten Kalibriermatrix sollten die Eingabewerte, mit deren Hilfe die Projektionsmatrix  $P$  geschätzt wird, geeignet konditioniert sein. So können bei entsprechend schlecht konditionierten Eingabewerten numerische Probleme entstehen, die eine hinreichend genaue Schätzung von  $P$  verhindern [Sch05b].

Hartley und Zisserman schlagen daher vor, die Eingabewerte vor der Verarbeitung zunächst zu normieren [HZ04]:

1. Zunächst werden alle 2D-Passpunkte  $p_{2D}$  so um  $d_{norm2D} = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}$  verschoben, dass ihr gemeinsamer Schwerpunkt im Nullpunkt liegt:

$$d_{norm2D} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{2D_i}}{n} \quad (2.14)$$

$$p'_{2D_i} = p_{2D_i} - d_{norm2D} \quad (2.15)$$

2. Es wird von all diesen verschobenen Punkten der mittlere Abstand zum Ursprung ermittelt, um die Punkte so um  $s_{norm2D} = \begin{pmatrix} sx \\ sy \end{pmatrix}$  bezüglich des Ursprungs zu skalieren, dass ihr mittlerer Abstand  $\sqrt{2}$  beträgt:

$$s_{norm2D} = \frac{n \cdot \sqrt{2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{x_{p_{2D_i}}^2 + y_{p_{2D_i}}^2}} \quad (2.16)$$

$$p''_{2D_i} = p'_{2D_i} \cdot s_{norm2D} \quad (2.17)$$

Analog wird dies für die 3D-Eingabewerte vorgenommen, sodass  $d_{norm3D}$  und  $s_{norm3D}$  ermittelt wird.

Nun müssen  $d_{norm2D}$ ,  $s_{norm2D}$  sowie  $d_{norm3D}$ ,  $s_{norm3D}$  zwischengespeichert werden, einerseits da nach der Kalibrierung die eingehenden 3D-Trackingwerte ebenfalls entsprechend normiert werden, andererseits, um die entsprechende Rücktransformation zum Erhalt der 2D-Bildschirmkoordinaten beim Anwenden der Projektionsmatrix  $P$  zu erhalten. Folgende Vorgehensweise ist somit beim Einsatz der Normierung nach der Durchführung der STK erforderlich:



1. Erhalt eines 3D-Raumpunktes durch das Tracking,
2. Verschiebung des 3D-Punktvektors um  $-d_{norm3D}$  und Skalierung um  $s_{norm3D}$ ,
3. Anwenden der Projektionsmatrix  $P$  auf den verschobenen und skalierten 3D-Raumpunkt und
4. Skalierung des Ergebnisvektors um  $\frac{1}{s_{norm2D}}$  und Verschiebung um  $d_{norm2D}$ .

---

### 2.3 Zusammenfassung und Wertung

Die mobile AR-Technologie ermöglicht die Unterstützung industrieller Prozesse durch die Bereitstellung bedarfsgerechter Informationen. Dabei können sowohl kongruente als auch nicht-kongruente Visualisierungsarten in Systemen mit teilweise oder vollständig (un-)gekoppelten Systemkomponenten und unterschiedlichen Visualisierungstechniken genutzt werden. Welche Visualisierungsart und -technik mit welcher Kopplung der Systemelemente im konkreten Anwendungsfall eingesetzt wird, ist vom Zweck des Einsatzes und den bestehenden Randbedingungen abhängig.

Für die Darstellung kontextbezogener, nicht-kongruenter AR-Informationen kann der Einsatz von LookAround-Displays sinnvoll sein. Für industrielle Prozesse, bei denen beide Hände frei sein müssen und die Sicht auf die reale Welt nicht eingeschränkt sein darf, sollten mobile VST- oder PST-HMDs sowie Handheld-Displays nicht genutzt werden. Speziell für Einsatzfälle, bei denen Anwendern permanent Informationen im Sichtfeld bereitgestellt werden müssen (zum Beispiel Navigations- oder Montagehinweise), erscheint der Einsatz von OST-HMDs vielversprechend. Gerade aus arbeitsschutztechnischen Gesichtspunkten ist die OST-Technologie vorteilhaft, da Geräte existieren, die im Gegensatz zu LookAround-Displays kaum eine Beeinträchtigung des Sichtfelds verursachen. Daher liegt im weiteren Verlauf der Arbeit der Fokus auf OST-HMDs.

Für eine lagerichtige Darstellung auf dem OST-Display ist die Durchführung einer See-Through Kalibrierung erforderlich, wobei für die Ermittlung der Projektionsmatrix die Singulärwertzerlegung zusammen mit einer Normierung nach Hartley und Zisserman durchgeführt werden sollte.



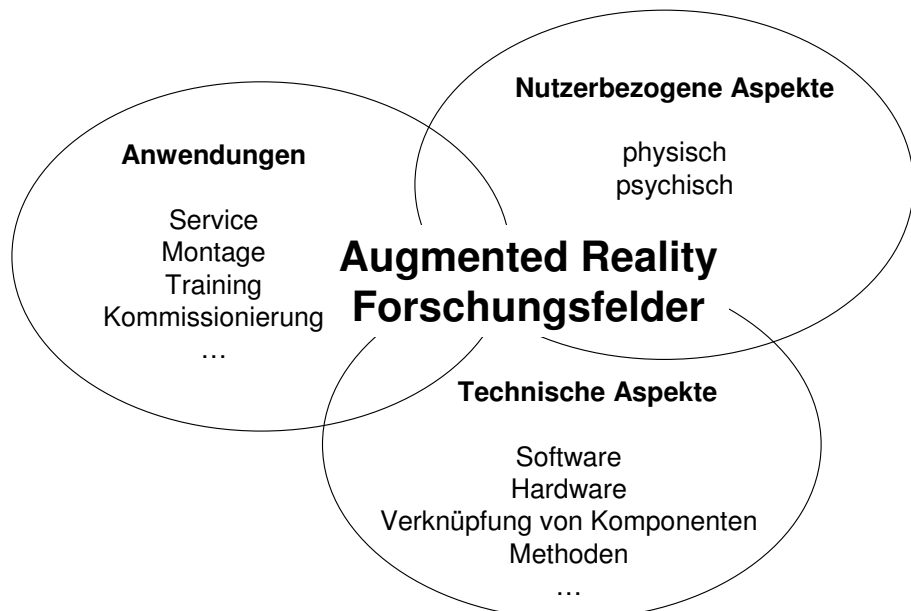
# 3

## Forschungsstand und Stand der Technik

### 3.1 Einleitung

Seit der Begriff der „Augmented Reality“ Anfang der 1990’er Jahre durch Boeing geprägt wurde [Miz01] hat die Technologie eine stete Weiterentwicklung erfahren. Ein Überblick über Forschungsthemen der letzten Jahre wird durch Zhou et al. gegeben [ZDB08]. Der Stand der Forschung auf dem Gebiet der Augmented Reality wird in der vorliegenden Arbeit in drei Bereiche eingeteilt (Abbildung 3.1).

Abbildung 3.1: Unterschiedliche Forschungsfelder für die AR



Quelle: Eigener Entwurf

*Anwendungsfälle* beschreiben den Einsatz der AR-Technologie in unterschiedlichen Szenarien zum Beispiel in der Industrie. Dabei steht in diesem Forschungsbereich meist der Nachweis des Nutzenpotenzials durch den Einsatz prototypischer AR-Systeme und die anschließende Abschätzung möglicher

cher Kosteneinsparungen gegenüber bisher verwendeter nicht-AR-Systeme im Vordergrund. Ein Transfer in den produktiven Einsatz ist jedoch nur möglich, wenn die technischen und nutzerbezogenen Fragestellungen des Anwendungsprototyps ebenfalls erfolgreich bearbeitet wurden.

*Technische Aspekte* betreffen die Hard- und Software des AR-Systems wie die Entwicklung neuer Systemkomponenten, Verfahren und Algorithmen. Sie müssen erforscht werden, um geeignete Anwendungsprototypen erstellen zu können. Ergebnisse erster prototypischer Anwendungen fließen in diesen Bereich zurück, sodass durch den Einsatz technischer Komponenten in einem Demonstrator gegebenenfalls neue Fragen aufgezeigt werden, die wiederum die weitere Verbesserung technischer Komponenten oder die Erforschung neuer technischer Methoden und Verfahren erforderlich machen.

Ein für diese Arbeit wesentlicher Bereich betrifft die *nutzerbezogenen Aspekte*, wozu psychologische oder medizinische Fragestellungen zählen. Dieser Bereich steht ebenso wie die anwendungsbezogenen und technischen Bereiche nicht allein sondern ist eng mit den beiden anderen verknüpft. Der Mensch setzt die entwickelten technischen Komponenten in Anwendungen ein, sodass sowohl die Hard- und Software als auch die Anwendung auf den Nutzer einwirken. Die nutzerbezogenen Aspekte betreffen demnach die Optimierung technischer und anwendungsseitiger Parameter, sodass der Anwender nicht zu hoch oder zu gering psychisch und physisch beansprucht ist, effizient arbeiten und die Potenziale der mobilen AR-Technologie voll ausschöpfen kann.

---

## 3.2 Anwendungen

Abbildung 3.2: Verlegung von Kabelbäumen auf einer Flugzeugrumpfschale



Quelle: [Val98]

Frühe Forschungsarbeiten im Bereich der AR-Anwendungen bezogen sich überwiegend auf den Einsatz *mobiler AR-Technologien*, so zum Beispiel für die Verlegung von Kabelbäumen im Flugzeugbau [Miz01], wo Werkern lagerichtig der Leitungsverlauf auf einer Rumpfschale angezeigt wurde (Abbildung 3.2). Hierbei wurde evaluiert, inwieweit die AR Prozesse in ausgewählten Szenarien optimieren kann.

Eine wesentliche Herausforderung für die Anwendung mobiler AR-Systeme stellen dabei technische Aspekte wie die Entwicklung funktionaler *OST-*

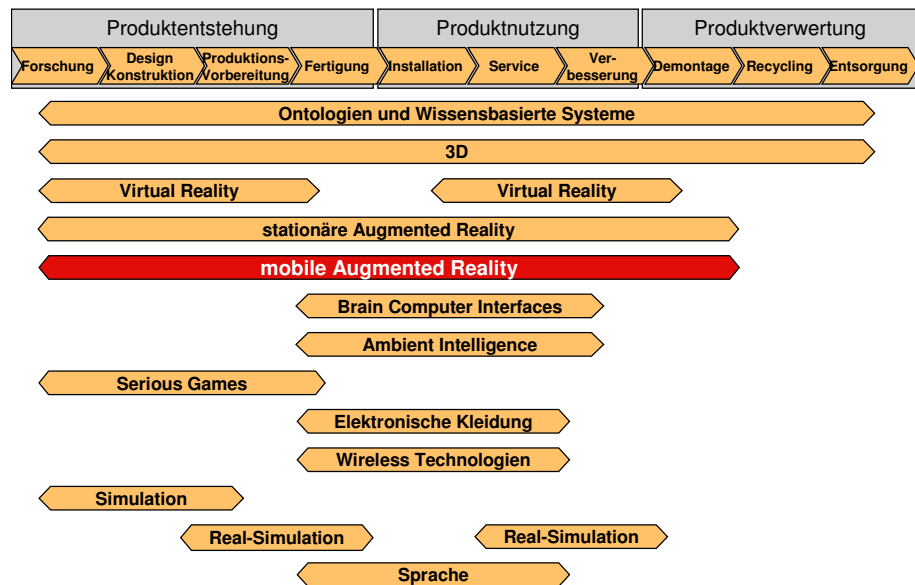
HMDs dar. Prototypische mobile AR-Systeme wurden seither sowohl für den Outdoor-Bereich [HF04, PST04] als auch für den Indoor-Bereich entwickelt [WPLS05].

Ein enormes Nutzenpotenzial wurde für fast alle Bereiche nachgewiesen, bei denen manuelle Tätigkeiten einen hohen Informations- und Unterstützungsbedarf haben, insbesondere wenn Nebentätigkeiten mit einer Informationsaufnahme parallelisiert werden können [Alt02]. Dennoch werden mobile AR-Systeme in der Industrie bis heute nicht produktiv eingesetzt. Der „Gartner Hype Cycle of Emerging Technologies 2008“, durch welchen der Reifegrad und die Erwartungen an neue Technologien beschrieben wird [Fen08], verdeutlicht, dass die AR-Technologie (hier im Speziellen die mobile AR) im Jahr 2008 noch nicht weit genug entwickelt war, um sich industriell etablieren zu können.

### Schwerpunkt Industrie

Durch Forschungsprojekte wurden Prototypen in vielen industriellen Einsatzbereichen erstellt. Eines der für die Industrie wesentlichen Forschungsprojekte stellt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „ARVIKA“ dar, in dem von 1999 bis 2003 18 namhafte Unternehmen und Institutionen den Einsatz der Augmented Reality Technologie in den Anwendungsbereichen Entwicklung, Produktion und Service für Automobil- und Flugzeugbau sowie Maschinen- und Anlagenbau untersuchten [Fri04].

Abbildung 3.3: Einsatz von Basistechnologien von der Produktentstehung bis zur Produktverwertung



Quelle: Eigener Entwurf nach [Sch08]

Die möglichen Einsatzbereiche der mobilen Augmented Reality sind sehr vielfältig und erstrecken sich in der Industrie von der Produktentstehung über deren Nutzung bis zur Produktverwertung [Alt02]. Abbildung 3.3 stellt dies im Vergleich zu einigen anderen Basistechnologien dar.

Neuartige Fertigungsverfahren können mithilfe der Augmented Reality im Bereich der Forschung erprobt werden. Gleichzeitig kann die mobile AR im Prototypenbau genutzt werden, um Arbeitsprozesse zu beschleunigen [HAG04].

Im Design können mithilfe der Augmented Reality frühzeitig Entwürfe vor einem breiten Publikum plastisch sichtbar gemacht werden. Hierfür werden

verschiedene Erscheinungsbilder eines geplanten Produktes auf Tonmodelle projiziert und somit dem Betrachter visualisiert. Während dieses nicht-mobile Verfahren bereits vergleichsweise weit entwickelt wurde [Can04], ist die Unterstützung im Design durch mobile AR überwiegend prototypisch. Der Bedarf an mobilen AR-Systemen für das Design ist verglichen zu stationären AR-Systemen gering [KDB<sup>+</sup>02].

Für den Bereich der Konstruktion eignet sich die mobile AR besonders, um noch nicht real existierende Bauteile in prototypische reale Karosserien ein- oder auszubauen und somit Erreichbarkeits- und Ein- / Ausbauuntersuchungen durchzuführen [PNYT<sup>+</sup>05]. Dadurch können mögliche Probleme im Fertigungsprozess oder beim Service frühzeitig vermieden werden, indem der Konstrukteur eine Baugruppe im Kontext des gesamten Fahrzeugs bewusst wahrnehmen kann und er ein Gefühl für die Auswirkungen von Konstruktionsänderungen auf benachbarte Komponenten bekommt. Dies kann besonders durch vor Ort eingesetzte mobile AR-Technologien geschehen.

Für die Produktionsvorbereitung eignet sich die mobile AR in der Fertigungsplanung, indem Produktionsplaner auf einem Display live den Ist-Zustand der Halle mit dem Soll-Zustand aus einem Computer Aided Engineering (CAD)-Modell der Halle vergleichen können [DSAP03, Doi03].

Weitere Schwerpunkte für die mobile Augmented Reality liegen heute in den Bereichen Fertigung, Installation und Service. Werker können durch mobile AR-Systeme direkt im Prozess durch Hinweise zu einzelnen Arbeitsschritten unterstützt werden, indem an zu bearbeitenden Bauteilen virtuelle Hinweise eingeblendet werden. Suchzeiten werden verringert und unnötige Kopf- und Augenbewegungen vermieden [TOBM03]. Gleichzeitig lassen sich diese Systeme für die Qualitätssicherung nutzen, sodass Montagefehler direkt im Arbeitsschritt erkannt und daraufhin frühzeitig behoben werden können [TSBM08]. Ein enormes Einsparpotenzial durch Fehlervermeidung und Zeiteinsparung ist für den Einsatz in der Fertigung und im Service nachgewiesen [Alt02]. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die beteiligten Werker mithilfe mobiler AR-Systeme zu trainieren, indem sie zunächst in realitätsnahen Einsatzszenarien virtuelle Objekte bearbeiten, bevor sie die tatsächliche Arbeit am realen Objekt durchführen [HSHS05].

Die mobile AR bietet weiterhin Chancen zur Verbesserung / Optimierung von Prozessen, indem veränderte Prozessabläufe vor der tatsächlichen Realisierung zunächst in der realen Umgebung virtuell „erprobt“ werden [Sch06b].

In der Demontage besteht ein ähnlich hohes Nutzenpotenzial wie in der Fertigung und im Service, da hier je nach Anforderung Arbeitsschritte in umgekehrter Montagereihenfolge durchgeführt werden können.

Als Ergebnis der bisherigen Arbeiten sind für einige Anwendungen inzwischen Produkte verfügbar [Met08, ART08]. Da eine generische „mobile AR-Anwendung“ nicht möglich ist [PBDM07], sind je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen zu spezifizieren und die AR-Anwendung entsprechend in die bestehenden Prozesse zu integrieren.

Eine Potenzialabschätzung für einen ausgewählten Anwendungsbereich kann so durchgeführt werden, dass zunächst die Dauer einzelner Arbeitsschritte an einem Arbeitsplatz durch die „MTM-Analyse“ [BL06] aufgeschlüsselt wird. Durch die Möglichkeit, Nebentätigkeiten und Informationsaufnahme zu parallelisieren, können Laufwege zu Monitoren oder das Ablesen in Handbüchern vermieden werden. Somit reduziert sich die für die Ausführung der Arbeits-

schritte notwendige Zeit. Da je eingesparter Minute ein Einsparpotenzial ausweisbar ist, kann so abgeschätzt werden, ob sich der Einsatz der mobilen AR im konkreten Fall lohnt. Weiterhin können durch die AR Fehler und damit teure Nacharbeit vermieden werden. Reduzieren sich durch den Einsatz der mobilen AR die Fehler zum Beispiel um 75% (vgl. Kapitel 4.5.3), so kann dadurch auch 75% der Nacharbeit vermieden werden. Dieses Einsparpotenzial ist jedoch schwieriger kalkulierbar als die Zeiteinsparungen, da für exakte Angaben zunächst Untersuchungen am konkreten Szenario notwendig sind. Es kann nicht ungeprüft das Fehlervermeidungspotenzial eines Anwendungsbereiches auf das eines anderen übertragen werden.

### Weitere Anwendungsfelder

Neben industriellen Anwendungsfeldern bietet die mobile AR Potenzial für weitere Bereiche. Die wesentlichen sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

**Medizin** Verschiedene Forschungsarbeiten untersuchen den Einsatz der mobilen AR für das Training, die Operationsvorbereitung und die Operationsdurchführung in der Medizin [BFO92, SLW02, BOH<sup>+</sup>08]. Hierzu werden Daten aus Voruntersuchungen (gewonnen durch Ultraschall-, Röntgen-, Computertomographie- oder Magnetresonanztomographieuntersuchungen) in einem HMD oder auf einem frei im Sichtfeld positionierbaren Display eingeblendet, sodass dem Operateur die Informationen direkt auf dem Patienten oder auf physischen Patientenmodellen lagerichtig dargestellt werden.

**Militär** Für den Bereich Militär bietet die mobile AR die Möglichkeit, das Training in realen Umgebungen zu unterstützen, indem durch ein OST-HMD die Sicht auf die reale Umgebung gewährt wird und gleichzeitig „virtuelle Gegner“ in der Umgebung dargestellt werden [BSC06]. Daneben können im Gefecht taktische Informationen durch den Einsatz von HMDs visualisiert werden [JBL<sup>+</sup>00].

**Architektur und Geographie** Die Visualisierung von Daten aus Geoinformationssystemen<sup>5</sup> oder neuen Gebäuden in bestehenden Umgebungen bietet ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten für die mobile AR, indem Anwender über ein mobiles Display diese Daten lagerichtig visualisiert bekommen [Bro04, Sta06, SRM<sup>+</sup>07, RJM<sup>+</sup>07]. Außerdem können im Consumerbereich mit heute verfügbaren Mobiltelefonen durch die Kopplung von GPS, Kamera und Bewegungssensoren Informationen zu interessanten Orten lagerichtig im Kamerabild dargestellt werden [KM06, TCG<sup>+</sup>08].

**Marketing und Entertainment** Zwei Bereiche, die besonders stark private Endanwender betreffen, sind das Marketing und das Entertainment. Hierbei wird die mobile AR dafür genutzt, bei potenziellen Kunden das Interesse am Produkt [ZNL00] oder aber das Erleben einer Umgebung, z.B. eines Museums [MMT<sup>+</sup>08], zu steigern. Anwendern werden die AR-Inhalte auf tragbaren, ausleihbaren Displays oder dem eigenen Mobiltelefon dargestellt [SW08].

---

<sup>5</sup> z.B. unterirdische Rohrleitungsverläufe oder Grundstücksgrenzen

---

### 3.3 Technische Aspekte

In verschiedenen Forschungsprojekten wurde das Potenzial der mobilen Augmented Reality zur Verbesserung industrieller Anwendungen identifiziert. Damit die mobile AR in Anwendungen genutzt werden kann, sind technische Aspekte wie die geeignete Gestaltung von Hard- und Softwarekomponenten zu untersuchen.

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten ARVIKA-Nachfolgeprojekt „ARTESAS“ beschäftigten sich 2004 bis 2006 neun Partner speziell mit der Entwicklung technischer Komponenten wie industriell brauchbaren, markerlosen Trackingverfahren, verschiedener HMD-Gerätetechnik sowie deren Erprobung [FW06]. Nachdem in ARVIKA und ARTESAS sowohl technische als auch anwendungsorientierte Fragestellungen bearbeitet wurden, stellt das BMBF-geförderte Nachfolgeprojekt „AVILUS“ (Laufzeit 2008 bis 2011) die konsequente Fortsetzung dar. Die Ergebnisse der ersten Projekte wurden aufgegriffen, Fragestellungen auf den gesamten Produkt- und Produktionsmittelbenszyklus erweitert und Forschungsarbeiten der Technologielieferanten und Anwendungspartner kombiniert [Sch08].

Heute aktuelle Forschungsarbeiten zu technischen Themen betreffen markerlose Erfassungsverfahren [KM07] sowie die Sensor-Fusion, also die Kombination verschiedener Erfassungssysteme [NSB<sup>+</sup>06]. Bisherige Arbeiten beschreiben hier besondere Herausforderungen bei der Kompensation von Abweichungen verschiedener Trackingsysteme [CJP03]. Weiterhin sind projektive mobile AR-Anwendungen ein Schwerpunkt, wobei mittels tragbarer mobiler Projektoren Informationen auf der Umgebung oder der Handfläche visualisiert werden [Boy09].

Um die mobilen AR-Systeme in die bestehende IT-Landschaft zu integrieren, müssen mittels geeigneter Softwareschnittstellen Anbindungen an bestehende Systeme geschaffen werden. Die Umsetzung und Optimierung von Algorithmen für die Darstellung, Verarbeitung und Interaktion auf mobilen Endgeräten [WS03, BF07] oder die automatisierte Generierung von Handlungsanweisungen für solche Systeme [Teg07] stellt einen weiteren Forschungsschwerpunkt dar.

Lange Zeit stellte die geringe Verarbeitungskapazität der eingesetzten Rechen-technik eine Herausforderung dar [Reg06]. Diese ist heute durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger mobiler Kleincomputer (z.B. UMPC, aktuelle Mobiltelefone [SW08]) weitgehend überwunden.

Da in einem Langzeiteinsatz das Gewicht zusätzlicher mitgeführter Geräte leicht zu einem Störfaktor werden kann [Ull06], betreffen weitere technologische Herausforderungen unter anderem die Entwicklung verbesserter mobiler Ausgabegeräte [KTEU00, FW06]. Ein grundsätzliches Problem der heute verwendeten kopfgetragenen Anzeigegeräte stellt die technische Bereitstellung des AR-Bildes dar. Aktuell werden die AR-Einblendungen ausschließlich in einer festen virtuellen Sehdistanz dargestellt [Men01], was dazu führt, dass die Anwender stets zwischen dem virtuellen Bild und der realen Welt akkommodieren müssen. Dies führt zu schneller Augenermüdung und kann sich negativ auf das Wohlbefinden des Nutzers auswirken [ZOL05]. Erste Ansätze sind bekannt, welche auch eine Nachführung der Optik / Bildsensorik bei Blickbewegungen berücksichtigen [Sut06, LCH08].



Auf die soeben angedeuteten Forschungsschwerpunkte technischer Aspekte (Erfassungs- und Verarbeitungssysteme, Schnittstellen) soll im weiteren Verlauf der Recherche nicht weiter eingegangen werden. Drei technische Bereiche, die jedoch wesentliche Bedeutung für den Einsatz mobiler AR in der Industrie haben, zählen zu den Bereichen der Ausgabegeräte und Algorithmen. Dies sind die OST-HMDs, die See-Through-Kalibrierung und die Navigation mittels AR.

1. Die OST-HMDs dienen zur Übermittlung der AR-Inhalte zum Anwender und stellen somit die technische Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine dar. Die HMD-Technologie berührt daher auch viele Bereiche der nutzerbezogenen Aspekte mobiler AR und ist somit für die vorliegende Arbeit von Bedeutung.
2. Die STK ist beim Einsatz von OST-HMDs wichtig, damit die AR-Inhalte korrekt mit Objekten der Umwelt registriert sind. Eine fehlerhafte Überlagerung kann zu Fehlern in der Ausführung von Arbeitsschritten führen. Weiterhin bedeuten Überlagerungsfehler möglicherweise eine stärkere kognitive Belastung des Nutzers, wenn dadurch die Einblendungen nicht mehr intuitiv verständlich sind.
3. Eines der wesentlichen Unterstützungspotenziale der mobilen AR stellt die Möglichkeit dar, die Navigation eines Anwenders mittels AR zu verbessern. Dadurch können Suchzeiten und Fehlerraten verringert und somit Arbeitsprozesse für den Anwender vereinfacht werden.

Daher wird nachfolgend eine Recherche zu diesen Gebieten beschrieben.

### 3.3.1 Head Mounted Displays

#### Anforderungen an den industriellen Einsatz

Im Verbundprojekt ARVIKA wurden folgende allgemeingültige Anforderungen an AR-HMDs benannt [Fri04]:

- Die Darstellungsgröße der Informationen im Display darf nicht zu klein (Fehlinterpretieren oder gänzlich übersehen der Information) und nicht zu groß (erhöhter Grad der Verdeckung der realen Welt) sein.
- Die psychische und physische Belastung durch die Anzeigetechnik muss für den Träger eines Displays so gering wie möglich gehalten werden.
- Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges liegt bei etwa einer Bogenminute. Wenn eine realistische Darstellung von Objekten erzielt werden soll, muss das Verhältnis Pixel pro Bogenminute über 1,0 liegen, damit keine einzelnen Pixel wahrgenommen werden können.
- Es muss eine möglichst gute Sicht auf die Realwelt erhalten bleiben.
- Falls sich das Anzeigegerät wie eine gewöhnliche Sehhilfe (Brille) auf dem Nasenrücken abstützt, darf das Gesamtgewicht des Anzeigegerätes 70 g nicht übersteigen, um einen guten Tragekomfort zu gewährleisten.
- Die Funktionalität einer Sehhilfe-Brille darf nicht beeinträchtigt werden.

Diese Anforderungen sind stark verallgemeinert und kaum quantifiziert. So ist beispielsweise nicht klar, wie viel Prozent Verdeckung des Sichtfeldes noch als „möglichst gute Sicht auf die Realwelt“ akzeptiert werden kann oder wie groß die tatsächliche psychische / physische Belastung durch ein HMD sein darf. Ohne quantifizierte Anforderungen können Displayhersteller keine industrietauglichen Geräte entwickeln, sodass ein Einsatz mobiler AR-Systeme nicht absehbar ist. Zukünftige Forschungsarbeiten müssen daher darauf ausgerichtet sein, diese Anforderungen an die Geräte auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anforderungen je Einsatzszenario weiter zu detaillieren.

Eine eigene Arbeit beschäftigte sich 2005 mit der Thematik der Industrietauglichkeit mobiler AR-Systeme [Tüm05]. Die dort benannten Kriterien betreffen nicht allein OST-HMDs, sondern Anforderungen an AR-Software, AR-Hardware und einen AR-gestützten Arbeitsplatz (siehe Anhang A.1). Die Anfertigung eines entsprechenden Kriterienkatalogs fand in Absprache mit Personal der Volkswagen Produktionsplanung statt, sodass diese Kriterien als „harte K.O.-Kriterien“ gewertet werden können, die zunächst erfüllt sein müssen, bevor ein AR-System tatsächlich industriell eingesetzt werden kann. Doch auch in diesem Kriterienkatalog sind nicht alle aufgeführten Punkte tatsächlich quantifiziert, die zulässige mentale und körperliche Belastung des Anwenders durch das AR-System ist nicht quantifiziert.

Oehme gibt einen Ausblick auf zu berücksichtigende Visualisierungs- und Handhabbarkeitskriterien [Oeh04]. Diese wurden in einem Workshop mit sieben Experten (Arbeitsvorbereiter, Produktionsingenieure und Informatiker) diskutiert und bewertet. Für die dabei erarbeiteten Kriterien wurde anschließend jeweils eine Wichtung ermittelt, um die Spezifikationen eines HMD zu bewerten und daraus eine Gesamtwertung berechnen zu können.

Speziell beim Einsatz in rauen Industrieumgebungen gelten besonders harte Anforderungen an Mensch und Technik. Ein möglicherweise ähnlich intensiver Einsatzbereich für AR-System ist das Militär: Der „MIL-STD 810“-Standard<sup>6</sup> der US-Armee beschreibt die erforderliche Widerstandsfähigkeit unterschiedlicher Geräte hinsichtlich verschiedener Umwelteinflüsse (Staub, Hitze, Erschütterungen und vieles mehr).

Bisher existieren keine allgemeingültigen Mindestanforderungen an OST-HMDs hinsichtlich der Gestaltungskriterien für Hard- und Software. Speziell zu den hier als wesentlich erachteten Themen der „Industrietauglichkeit“ und der „Langzeitverträglichkeit“ existieren keine speziellen Richtlinien. Dies spiegelt sich auch in der nachfolgend dargestellte Marktanalyse wider.

### Marktanalyse Head Mounted Displays

Seit Ivan Sutherland 1965 das erste HMD entwarf [Sut65], entwickelte sich die Technologie stark weiter. Anhang A.5 stellt die heute verfügbaren<sup>7</sup> recherchierten Geräte und ihre Eigenschaften vor. Um eine einheitliche Vergleichsbasis zu haben, müssen Merkmale identifiziert werden, durch die die Geräte voneinander unterschieden werden können. Aufbauend auf Oehme [OSL02] und eigenen Vorarbeiten [Tüm05] sind folgende Kerneigenschaften identifiziert:

- *Ergonomie* - betrifft das Gewicht der Geräte, das Sichtfeld, die Durchsichteigenschaften, die Fokustiefe und den Abstand vom Auge zum

<sup>6</sup> Dieser wird auch angewandt auf HMDs

<sup>7</sup> teilweise nur als Prototypen oder Auslaufmodelle



Display, bei dem vollständige Bild wahrgenommen werden kann (Augenentfernung)

- *Visualisierungskriterien* - sind technische Eigenschaften zur Bilddarstellung wie die Display-Technologie, Auflösung, Mono- / Stereofähigkeit, Leuchtstärke, Kontrast, Farbdarstellung und die Bildwiederholrate
- *Industrietauglichkeit* - basiert auf Anhang A.1 und enthält die Merkmale Akkulaufzeit, Temperaturbereich, Luftfeuchtigkeit sowie Regularien, denen das Gerät entspricht
- *Stand der Produktentwicklung* - beinhaltet Kommentare zum Gerät (Einschätzung des Autors der vorliegenden Arbeit), den aktuellen oder geplanten Preis sowie ein Foto und die Quelle der aufgeführten Informationen

Da einige Hersteller auch auf Anfrage hin keine vollständigen Informationen zur Verfügung stellen konnten, bleiben einige Informationen unbekannt.

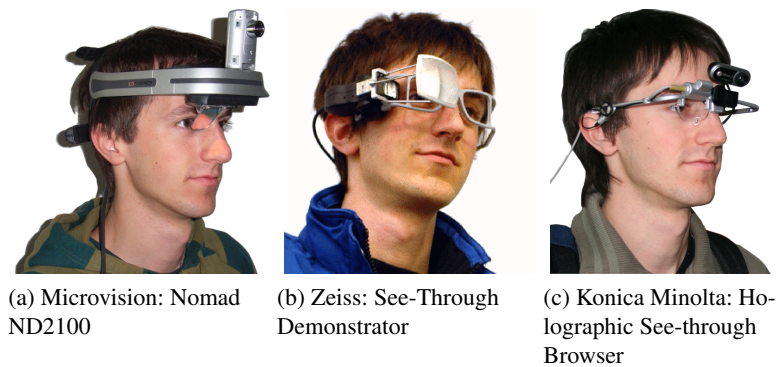
Durch die Recherche wird deutlich, dass aktuell nur sehr wenige Geräte zur Verfügung stehen (20 recherchierte Geräte, davon nur 8 käuflich zu erwerben). Viele der Geräte wurden für militärische Anwendungen entwickelt, so dass zum Beispiel eine Befestigung am Helm eines Soldaten möglich ist. Daher wurden viele Geräte nach Anforderungen entwickelt, die nur teilweise mit denen der Industrie übereinstimmen. Die Mehrzahl der Geräte ist vor allem durch ihr hohes Gewicht nicht für die Industrie einsetzbar. Schließt man diese Geräte (Gewicht > 200 g) aus, so bleiben wenige übrig, die hinsichtlich ihrer Eignung im industriellen Umfeld überprüft werden können. Doch auch diese erfüllen die Anforderungen für einen industriellen Einsatz nur ungenügend oder sie sind bisher nicht käuflich zu erwerben (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Für den industriellen Einsatz aussichtsreiche Geräte

Hersteller	Gerät	Kommentare
KonicaMinolta	Holographic See-through Browser	Prototyp
LASTER Technologies	Pro Mobile Display	Prototyp
LitEye	LE-500	Produktion eingestellt
LitEye	LE-750	große Verdeckung des Sichtfeldes
Lumus	PD1x	Prototyp (z.B. PD10)
Lumus	PD2x	Prototyp (z.B. PD20)
Microvision	Nomad 2	Produktion eingestellt
Rockwell Collins	ProView SL40	Produktion eingestellt
Rockwell Collins	SO35-MTV	Gerät angekündigt aber bisher nicht erhältlich
Shimadzu	Dataglass 3/A	nur 3% Durchsichtrate
Trivisio	M3	nur 25% Durchsichtrate
Trivisio	Vew-Up Monocular Display	Prototyp
Zeiss	OST Demonstrator	Prototyp, Entwicklung eingestellt

Bis heute existiert kein Gerät, welches industriell im Langzeiteinsatz genutzt werden kann. Nur wenige der recherchierten Geräte entsprechen annähernd

Abbildung 3.4: Darstellung ausgewählter OST-HMDs



Quelle: Eigene Aufnahmen

den bisher bekannten Anforderungen. Dennoch besitzen einige positive Eigenschaften, die an dieser Stelle herausgestellt werden sollen (Abbildung 3.4).

Das Microvision Nomad ND2x00 (Abbildung 3.4a) nutzt für die Darstellung keine herkömmliche Displaytechnologie, sondern ist ein sogenanntes Retinal Scanning Display. Hierbei schreibt ein Laserstrahl, der über einen halbdurchlässigen Spiegel umgelenkt wird, zeilenweise ein Bild direkt auf die Netzhaut des Auges. Da der Laser im Gegensatz zum „normalen“ Licht eine wesentlich höhere Intensität bei einer genau definierten Wellenlänge hat, können die verwendeten halbdurchlässigen Spiegel für eine maximale Lichtdurchlässigkeit optimiert und somit die Durchsichteigenschaften deutlich verbessert werden [Oeh04]. Das Gerät wurde unter anderem für einen Einsatz in der Produktion und im Service entworfen, die Ergonomie und das Sichtfeld (aktuell  $23^\circ \times 17.25^\circ$ ) bedürfen jedoch einer Verbesserung.

Der Zeiss See-Through Demonstrator (Abbildung 3.4b) wurde speziell für den Einsatz im Service mit dem Ziel entworfen, ein möglichst großes Sichtfeld bei gleichzeitig minimalem Gewicht zu erreichen. Ein Organic Light-Emitting Diode (OLED)-Projektor strahlt dabei auf einen relativ großen halbdurchlässigen, gekrümmten Spiegel, sodass eine der wesentlichen Herausforderungen für dieses Display die korrekte Bildverzerrung darstellt. Es wurden mehrere Demonstratoren gebaut, welche einen guten Kompromiss zwischen Sichtfeld (2. Version  $32^\circ \times 24^\circ$ ) und Gewicht ( $< 100$  Gramm) darstellen, dennoch ist heute die weitere Entwicklung gestoppt (Stand Februar 2009).

Ein weiterer bemerkenswerter HMD-Prototyp stammt von der Firma Konica-Minolta und wird als „Holographic See-through Browser“ bezeichnet (Abbildung 3.4c) [KTEU00]. Es stellt zurzeit das mit Abstand leichteste und kompakteste der recherchierten Geräte dar, basiert auf einem holografischen Anzeigeelement, wiegt nur 26 g und kann auf Nasenrücken-getragene Brillengestelle aufgesetzt werden. Das bisher geringe Sichtfeld (aktuell  $14^\circ \times 10^\circ$ ) sowie Probleme beim Einsatz gemeinsam mit herkömmlichen Sehhilfen sind die größten Kritikpunkte für dieses Gerät.

Bisher existiert kein geeignetes OST-HMD, welches für einen Langzeiteinsatz geeignet ist. Militärische Anwendungen setzen OST-HMDs bereits ein, Potenzialanalysen in der Industrie zeigten ebenfalls außerordentliches Nutzenpotenzial für die Anwendung der Technologie [Alt02]. Daher müssen Anforderungen an mobile AR-Systeme und HMDs identifiziert werden, indem grundlegende Fragestellungen zur Wahrnehmung und Ergonomie solcher Geräte bearbeitet werden.

Im Unterschied zur **OST**-Technologie existieren im Bereich der LookAround Displays bereits Heimanwender-Geräte, die deutlich unter 1000 Dollar kosten, sehr leicht sind und an beliebigen Brillen befestigt werden können (z.B. iBean-Display, Kosten \$300, Gewicht 10 g [Ama09]). Diese Tendenz lässt vermuten, dass die LookAround Displays in Kürze auch für industrielle Einsatzfälle anwendbar sein werden. Dadurch besteht die Chance, die Akzeptanzschwelle zum Einsatz mobiler, kopfgetragener Displaysysteme beim Endanwender zu überwinden, indem zunächst LookAround Systeme für erste Anwendungen ohne kongruente Überlagerungen eingesetzt werden. Doch auch für diese Geräte gilt es, die industrielle Einsatztauglichkeit durch Studien zu technischen Aspekten aber auch zur Ergonomie und Verträglichkeit nachzuweisen.

Während andere Displaysysteme für den Heimanwenderbereich bereits verfügbar sind und Handheld-Displays schon industriell genutzt werden, besteht besonders auf dem Gebiet der **OST-HMDs** grundlegender Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Einsatzpotenziale müssen den Endanwendern verdeutlicht und nutzerbezogene Aspekte verbessert werden.

### Aktuelle Forschungsarbeiten zu Head Mounted Displays

Neben den zuvor dargestellten **HMD**-Prototypen werden an dieser Stelle weitere zukunftsweisende Forschungsarbeiten zu **OST-HMDs** vorgestellt.

Abbildung 3.5: Entwurf eines **HMDs** für das **AR**-gestützte Training



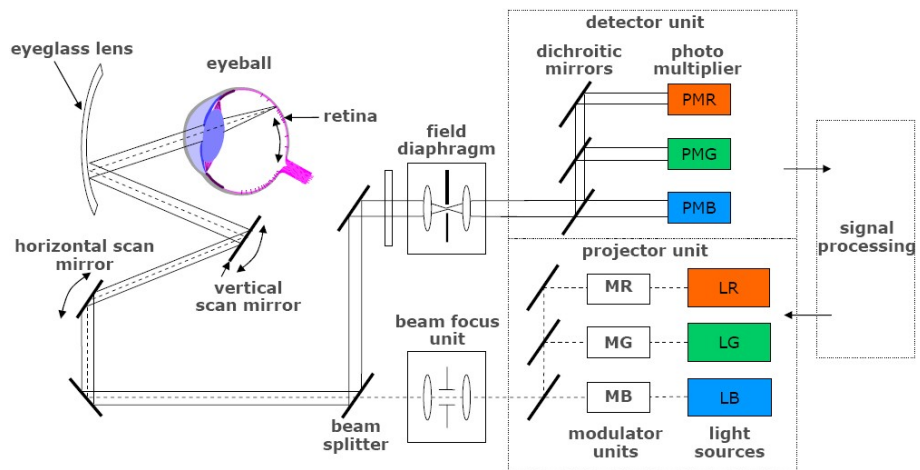
Quelle: [DBBG06]

Ein Konzept der Georgetown University (Washington, USA) beschreibt den Entwurf robuster und leichter **HMDs** für eine Trainingsanwendung (Abbildung 3.5) [DBBG06, Dos08]. Obwohl das bisherige Konzept vielversprechend erscheint, ist der Bau des Gerätes noch nicht absehbar.

Eine weitere Idee für ein neuartiges Displaysystem schlägt vor, dass eine Kamera von außen das auf die Retina projizierte Bild aufnimmt (Abbildung 3.6, „Detector Unit“). Dieses Bild wird am Rechner verarbeitet und die **AR**-Inhalte basierend auf diesem Bild im **HMD** eingeblendet (Abbildung 3.6, „Projector Unit“) [Bue03]. Die weitere Entwicklung wurde jedoch gestoppt.

Da bei heutigen Geräten eine Herausforderung darin besteht, bei zu hellem, durch das **HMD** eindringenden Licht die dargestellten Inhalte nicht mehr wahrnehmen zu können (Leuchtintensität der Geräte ist geringer als Intensität des eindringenden Lichtes), beschreiben Santos et al. 2007 ein **HMD**, bei dem einzelne Pixel undurchsichtig geschaltet werden können [SGSM07].

Abbildung 3.6: Entwurf eines HMD, welches das auf die Retina projizierte Bild verarbeitet (Kamera / Detector) und ergänzt (Projektor)



Quelle: [Bue03]

Bisherige OST-HMDs haben zusätzlich den Nachteil, dass die Informationen auf einer festen oder nur manuell justierbaren Fokalebene dargestellt werden. Liu et al. beschreiben einen neuartigen Ansatz, bei dem durch den Einsatz einer Linse auf Flüssigkeitsbasis diese Problematik gelöst werden kann [LCH08]. Damit diese Technik praktisch nutzbar wird, ist zwangsläufig eine Erfassung der Augen- oder Augenmuskelbewegungen notwendig, um automatisiert vom AR-System die korrekte Fokalentfernung einzustellen.

Insbesondere die Weiterentwicklung der Retinal Scanning Displays auf Laserbasis wird aktuell neben Microvision durch Brother [Ota08] und Apple [Kim08] vorangetrieben. Die Nutzung von Kontaktlinsen als Displaysystem wird derzeit von der Universität Washington untersucht [HSK<sup>+</sup>08]. Weitere Vorschläge für aussichtsreiche Displaysysteme wurden von Hoshi et al. [HTM<sup>+</sup>96], Rolland et al. [RBHL<sup>+</sup>05], Nezu [Nez05] und Kiyokawa [Kiy07] beschrieben.

Cakmakci und Rolland stellen in [CR06] einen detaillierten Überblick über Herausforderungen und den Stand der HMD-Entwicklung des Jahres 2006 dar.

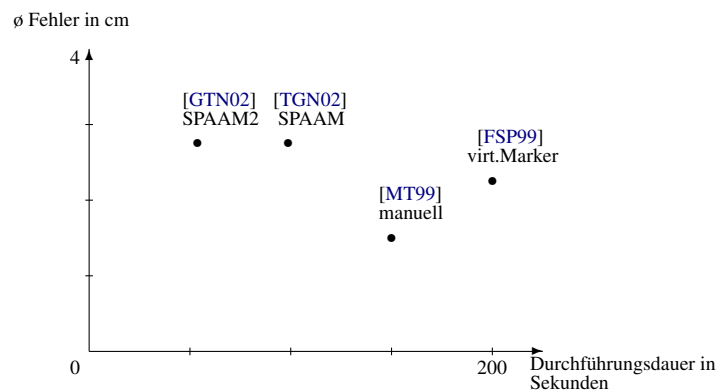
### 3.3.2 See-Through-Kalibrierung

Die STK dient der Ermittlung der Transformationsvorschrift zur Überführung von Trackingergebnissen aus einem Sensorkoordinatensystem ins Displaykoordinatensystem (vgl. Kapitel 2.2.4). Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die Methodik der Durchführung dar, die für einen industriellen Einsatz geeignet sein muss. Sie soll schnell von jedem Anwender durchführbar sein, wobei eine gute Qualität des Kalibrierergebnisses (d.h. ein geringer Überlagerungsfehler) erreicht werden muss.

In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur Durchführung der STK für Optical-See-Through Systeme beschrieben, Abbildung 3.7 stellt diese hinsichtlich ihrer Durchführungsdauer und des erreichten Überlagerungsfehlers bei ca. 70 cm Aufnahmeentfernung dar.

Eine Möglichkeit ist die manuelle Anpassung einiger Kalibrierparameter (Translation, Rotation, Skalierung) durch den Nutzer, bis eine gute Überlagerung zustande kommt [MT99]. Bei einem weiteren Verfahren wählt der Benutzer nacheinander verschiedene Punkte mit einem „virtuellen Marker“ an, um die Kalibrierung durchzuführen [FSP99]. Das „SPAAM“-Verfahren beschreibt die Überlagerung realer und virtueller Objekte [TGN02, GTKN01], wobei ins-

Abbildung 3.7: Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der recherchierten STK-Verfahren



Quelle: Eigener Entwurf teilweise basierend auf [TZO03]

besondere die räumliche Verteilung in der Tiefe als vorteilhaft erkannt wurde („Tiefen-SPAAM“, [TZO03]). Dieses Verfahren wurde für den Medizinbereich weiterentwickelt [Sut06]. Eine zusätzliche Erweiterung besteht darin, dass der Benutzer zu Beginn Einstellungen aus bereits abgeschlossenen Kalibrierungen laden kann (Vorkalibrierung), um nachträglich mit geringerem Aufwand die Kalibrierung anzupassen („SPAAM2“) [GTN02]. Eine Aufnahme verschiedener Kamera- und HMD-spezifischer Werte vor der eigentlichen Benutzung des AR-System wird ebenfalls diskutiert [OZTX04].

Verschiedene dieser Kalibrierverfahren wurden gegeneinander hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit und Genauigkeit getestet und bewertet [TZO03] mit dem Resultat, dass alle untersuchten Verfahren ungenau und schwierig zu handhaben sind.

Lou et al. verfolgen mit der Empfehlung, die STK möglichst gänzlich zu vermeiden, einen anderen Ansatz und schlagen vor, die Kamera für das optische Tracking parallel zur Sehachse des Auges („on-axis“) und möglichst nahe zum Auge am Display anzubringen [LRWP05]. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Überlagerungsgenauigkeit dieses Systems je nach Anwendungsfall sehr gut sein kann (Fehler von ca. 0,2 cm in 70 cm Entfernung), jedoch auch zusätzlichen Hardwareaufwand bedeutet und die Überlagerungsgenauigkeit schon bei geringem Verrutschen des Displays abnimmt. Die Zeitdauer zur Durchführung dieses Verfahrens (korrektes Aufsetzen) ist unbekannt.

Bei den heute üblichen Verfahren zur STK werden nacheinander einzelne 2D-3D-Punktkorrespondenzen, hier als „2D-3D-Passpunkte“ bezeichnet, aufgenommen. Durch das mehrmalige Neupositionieren des Anwenders bzw. der AR-Einblendung ist diese Prozedur schlecht handhabbar [TZO03]. Zudem ist den Anwendern grundsätzlich freigestellt, welche exakten 2D- bzw. 3D-Punkte sie in das System eingeben, sodass möglicherweise ungeeignete Eingaben (z.B. zu geringe Variationen der Wertepaare, vgl. Kapitel 5) erfolgen.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass bisher noch kein Verfahren hinsichtlich einfacher Handhabbarkeit bei gleichzeitig geringem Überlagerungsfehler entwickelt wurde. Bei der Anwendung der recherchierten Verfahren gibt es Tendenzen hinsichtlich der Benutzung des von Tuceryan und Genc beschriebenen SPAAM-Verfahrens [TGN02, GTN02]. Unklar ist dabei aber bisher, in welcher Form unterschiedliche Wertebereiche der Eingabeparameter Einfluss auf die resultierende Überlagerungsgenauigkeit haben. Weiterhin ist unklar, welchen Einfluss eine ungenaue Kalibrierung auf die Beanspruchung der Anwender hat (erhöhter Suchaufwand bei fehlerhaften Einblendungen).



### 3.3.3 AR-gestützte Navigation

Eines der wesentlichen Unterstützungspotenziale der mobilen AR liegt in der Bereitstellung „räumlichen Wissens“, wodurch Suchzeiten verringert und Fehler vermieden werden können [DMHF05]. Dieses Potenzial kann für alle Anwendungen genutzt werden, bei denen die Navigation des Anwenders eine wesentliche Aufgabe darstellt.

Es kann in zwei Führungsarten „grob“ und „fein“ unterschieden werden [SFPK06]: Mithilfe der „Grobnavigation“ kann der Anwender aus der Ferne in die Nähe eines Ziels (z.B. ein Regal) navigiert werden, um danach durch die „Feinnavigation“ auf die exakte Lageposition (z.B. ein Fach im Regal) hingewiesen zu werden. Räumliches Wissen ist ein Überbegriff für zahlreiche Aspekte, die mit Raum, Wahrnehmung und Verarbeitung visueller Informationen einhergehen: Die räumliche „Orientierung“ bezeichnet das Wissen um die eigene Position und Blickrichtung bezüglich eines räumlichen Systems sowie die Position von Objekten zueinander [DS77, Mai94]. „Wayfinding“ ist ein kognitiver Prozess, bei dem während der Fortbewegung einer Person zu einem Ziel ein Weg oder Pfad durch die Person definiert wird, wobei kontinuierlich räumliche Informationen gesucht und angewandt werden [DS93, BKJP05]. Die „Bewegung“ ist das motorische Element des Navigierens, bei dem eine Person oder ein Objekt seine Koordinaten bezüglich eines Bezugssystems ändert. Die „Navigation“ ist die Fusion der Teilaufgaben Wayfinding und Bewegung [DP02].

Mobile AR-Systeme können die Vermittlung dieser räumlichen Informationen auf unterschiedliche Art und Weise unterstützen:

- Lenken der Aufmerksamkeit: Ein bestimmtes Objekt befindet sich in unmittelbarer Umgebung des Nutzers. Das mobile AR-System hat die Aufgabe, gezielt die Aufmerksamkeit auf das Objekt im Raum zu lenken. Der Empfänger der Information muss darüber entscheiden, ob und wie diese Information für eine Navigationsunterstützung genutzt werden kann.
- Visualisierung der eigenen Position: Die Aufgabe des Systems besteht darin, den Orientierungsprozess des Nutzers durch die Darstellung der eigenen Position im Bezug zur Position anderer Objekte zu unterstützen.
- Aktive Navigationsunterstützung: Diese Aufgabe umfasst die Darbietung visueller Hilfsmittel, die z.B. durch explizite Richtungsanweisungen aktiv die Navigation des Nutzers zur Lösung einer Wayfinding-Aufgabe unterstützen.

Navigations- und Orientierungshinweise stellen Hilfen zur Bestimmung von Richtung und / oder Position dar und können somit für eine „Grobnavigation“ genutzt werden. Diese können unterschieden werden in implizite (Benutzer muss selbst entscheiden, wie er zum angegebenen Ziel gelangt) und explizite Hinweise (Benutzer kennt Ziel nicht, bekommt Richtung vorgegeben, in die er sich bewegen soll) [WF07]. Während bei impliziten Hinweisen Wegpunkte, Koordinaten, Karten oder Pfade vorgegeben sind, anhand derer der Nutzer den Weg zum Ziel finden soll, wird bei expliziten Hinweisen eine Richtung (zum Beispiel durch einen Pfeil) vorgegeben, in die der Nutzer schauen oder laufen soll. Um den Prozess der Orientierung und Navigation im Referenzarbeitsplatz effizient zu unterstützen, wird eine angemessene Darstellung der

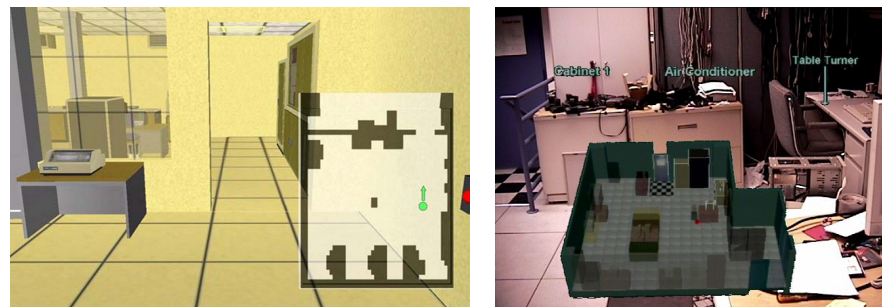
Orientierungs- und Navigationshilfen benötigt [TOBM03]. Diese Unterstützungsmethoden lassen sich durch die AR mithilfe unterschiedlicher Konzepte realisieren.

Die wesentlichen AR-relevanten Konzepte sind:

- Karten - exozentrische Repräsentationen der Umwelt, möglicherweise mit Anzeige der eigenen Position („You-Are-Here“-Prinzip (YAH) nach Richter und Klippel [RK04]) in verschiedenen Detailstufen (Multiscale), implizit für Navigation und Orientierung nutzbar
- World in Miniature, „WIM“ [SCP95] - ähnlich zu Karten, jedoch 3-dimensionale verkleinerte Abbildung der Umgebung (implizit)
- Kompass / Radar - egozentrische Anzeige der relativen Richtung des Nutzers bezüglich eines Bezugspunktes z.B. durch Pfeile (explizit)
- Zeichen - in der Umwelt platzierte Zusatzinformationen (implizit)
- Pfade - mehrere Positionen (Landmarken) semantisch verbunden, z.B. durch Linien, bei egozentrischer Sicht explizites Beschreiben einer Route [RS04]

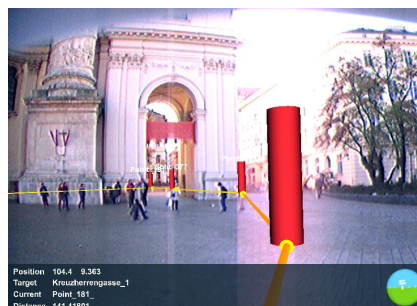
Abbildung 3.8 stellt einige dieser Unterstützungskonzepte dar.

Abbildung 3.8: Beispiele für Unterstützungskonzepte zur Navigation



(a) YAH-Karte

(b) WIM



(c) Pfadvorgabe durch Landmarken

Quelle: [IRC04] (links), [BFH02] (rechts), [RS04] (unten)

Für das Auffinden eines bestimmten Zielortes werden heute in der Industrie spezifische Koordinatenangaben genutzt (implizite Navigationshinweise). Soll ein Kommissionierer in einem Lager einen bestimmten Lagerort aufsuchen, so bekommt er diesen beispielsweise in der Form „Gang A, Bucht 16, Regal 1“ und einer zusätzlichen Teilenummer (Abbildung 3.9) auf einer Papierliste oder akustisch („Pick-by-Voice“) übermittelt. Diese Angabe nutzt der Kommissionierer, um sich einen Routenplan zu erstellen und zum jeweiligen Ziel zu navigieren. Eine andere Möglichkeit besteht in der expliziten Navigation mittels

Abbildung 3.9: Kommissionierliste mit Angabe des Lagerortes

Price	Qty	ID	Description	Aisle	Bay	Shelf
10.00	1	10460	Medium - Heather Grey - Swiss Army - Guys Tee - #TH878	A	16	1
10.00	1	13096	Medium - Lemon - How Hamburgers Are Made - Girly Tee - #TH1058	E	5	4

2 Total Items

Quelle: Threadless.com

„Pick-by-Light“. Bei diesem und ähnlichen Verfahren sind an allen Lagerorten im Regalbereich Signalleuchten angebracht. Soll ein Teil aus einem bestimmten Fach entnommen werden, so leuchtet eine Lampe am Zielfach. Die primäre Navigationsaufgabe des Kommissionierers besteht darin, alle leuchtend markierten Fächer abzarbeiten. Übliche Fehlerraten betragen beim Einsatz einer Papierliste 0,35%, bei Pick-by-Light 0,40% und bei Pick-by-Voice 0,08% [tHS04].

Wesentliche grundlegende Untersuchungen zur AR-gestützten Navigation wurden an der Universität Columbia durchgeführt [HFT<sup>+</sup>99, BFH02]. Hierbei wurde durch „World in Miniature“-Repräsentationen, 2D-Karten und 3D-Pfade innerhalb und außerhalb von Gebäuden eine Navigation auf dem Campus ermöglicht, wobei ein Schwerpunkt auf der Bereitstellung geeigneter Annotationen an Gebäuden lag. Ein weiteres System, bei dem ein Schwerpunkt auf der Bereitstellung von Gebäudeannotationen lag, entstand an der TU Wien [RS03, RS04], wobei dynamische Pfade, Richtungsinformationen in Form eines Kompasses, 2D-Karten oder numerische Informationen genutzt wurden. Ein besonders Merkmal war hier die Einbettung einer Kommunikation zwischen den Nutzern und Passanten. An der TU München wurde 2005 eine Untersuchung zur Aufmerksamkeitslenkung durchgeführt [TSLB05], wobei Autofahrern unterschiedliche Hinweiselemente (Pfeile, Karten) eingeblendet wurden, um die Richtung einer drohenden Gefahr zu visualisieren. In einem weiteren umfassenden Experiment der TU München sollten unterschiedliche Positionshinweise in der Kommissionierung hinsichtlich ihrer Effektivität untersucht werden [SFPK06]. Dabei wurden verschiedene nicht-AR-Methoden mit AR-Methoden (Pfeil- und Gummibandmetapher) verglichen, wobei die genutzten AR-Methoden kaum besser abschnitten als die nicht-AR-Methoden. Die Untersuchungen wurden bis Ende 2008 fortgeführt und werden 2009 in Form eines Abschlussberichtes verfügbar sein [GBRS09].

### 3.4 Nutzerbezogene Aspekte

Nutzerbezogene Fragestellungen betreffen die Auswirkungen der Technologie auf den Anwender im (Langzeit-)Einsatz, welche durch die Hard- und Softwareergonomie beeinflusst werden.

Da die mobile AR überwiegend die visuelle Wahrnehmung unterstützt, sind insbesondere die *Ergonomie* und *Usability* der Anzeigergeräte sowie von Visualisierungs- und Interaktionsmetaphern von besonderer Bedeutung. Dabei ist zu beachten, dass Kurzzeitstudien zur Untersuchung dieser Bereiche teilweise versagen [OMN<sup>+</sup>08]. Einen allgemeinen Überblick über zu beachtende Randbedingungen bei der Durchführung von Studien dieser Art bietet die „Usability Methods Toolbox“ [Hom09].

Einige abgeschlossene Untersuchungen zu nutzerbezogenen Fragestellungen



mit industriellem Einsatzfokus sind besonders im deutschsprachigen Forschungsraum zu finden [Ale05]. Dies lässt sich auf die zuvor erwähnten deutschen Leitprojekte wie ARVIKA oder ARTESAS zurückführen und setzt sich in aktuellen Vorhaben wie AVILUS fort. Durch diese und andere Projekte sind zwar in vielen Bereichen bereits offene nutzerbezogene Fragestellungen bekannt, jedoch wurden diese bisher nicht ausreichend gelöst, wodurch derzeit kein produktiver Einsatz der mobilen AR-Technologie in der Industrie möglich ist.

Bereits im Jahr 2005 zeigten Swan und Gabbard durch eine Recherche über mehr als 1100 Veröffentlichungen der weltweit bedeutendsten Konferenzen zu VR und AR, dass bis zu dieser Zeit nur wenige Publikationen auf Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion eingingen [SG05]. Nur knapp 2% der analysierten Arbeiten berichteten im Bereich der Augmented Reality über nutzerbasierte Experimente. Dies hat sich bis heute nicht merklich verbessert, insbesondere nutzerbasierte Langzeituntersuchungen stehen aus.

Eine der wenigen Untersuchungen zum Langzeiteinsatz der HMD-Technologie wird durch Brau und Ullmann beschrieben [BUDS05, Ull06]. Im dort durchgeführten Feldversuch wurde im Vollschiefeinsatz Kommissionierern die Möglichkeit gegeben, mittels eines HMDs Arbeitsaufträge entgegen zu nehmen. Aufgrund von „Befindlichkeitsstörungen“ der Probanden musste dieser Feldversuch jedoch vorzeitig beendet werden. Als mögliche Ursachen wurden Defizite der HMDs und HMD-Kopfträger sowie der Informationsvisualisierung erkannt. Dies verdeutlicht die Problematik, dass die bisherigen Ausgabegeräte und Darstellungsmetaphern nicht an den Nutzer und die Arbeitsprozesse angepasst sind.

Eine weitere Arbeit zum Langzeiteinsatz von Head Mounted Displays wird durch Pfendler et al. beschrieben [PWS05]. Hierbei wurden unter anderem die Suchleistung und die subjektive Beanspruchung beim Einsatz eines Handheld-Displays sowie eines HMDs unter Laborbedingungen in einem 130-minütigen Test verglichen. Im Ergebnis wurden keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen den Displays gefunden, jedoch tendenziell bessere Leistungen beim Handheld-Display. Zur Beanspruchung wurde festgestellt, dass die Probanden beim Einsatz des HMDs eine verstärkte Ermüdung empfinden und die Arbeitsleistung möglicherweise durch eine erhöhte Anspannung versuchen, aufrecht zu erhalten. Weiterhin ergaben sich für die Symptome Ermüdung, überanstrengte Augen, Druckgefühle im Kopfbereich, Schwierigkeiten scharf zu sehen und Konzentrationsschwierigkeiten signifikant höhere Ergebnisse als beim Handheld-Display. Daher wird empfohlen, den Einsatz von Handheld-Displays den HMDs vorzuziehen, soweit möglich. Die Ergebnisse des Beitrages sind für die vorliegende Arbeit folgendermaßen zu bewerten:

- Es wurde ein für heutige Verhältnisse veraltetes HMD eingesetzt (Xybernaut MA IV, eingeführt im Jahr 1999), somit sind die Ergebnisse nicht ohne Überprüfung auf heutige HMDs übertragbar.
- Aus der Beschreibung geht hervor, dass das verwendete Untersuchungsszenario den Nutzer nicht in einer augmentierten, realen Umgebung agieren ließ. Die Ergebnisse sind also nicht ohne weitere Überprüfung auf den Bereich der Augmented Reality übertragbar.

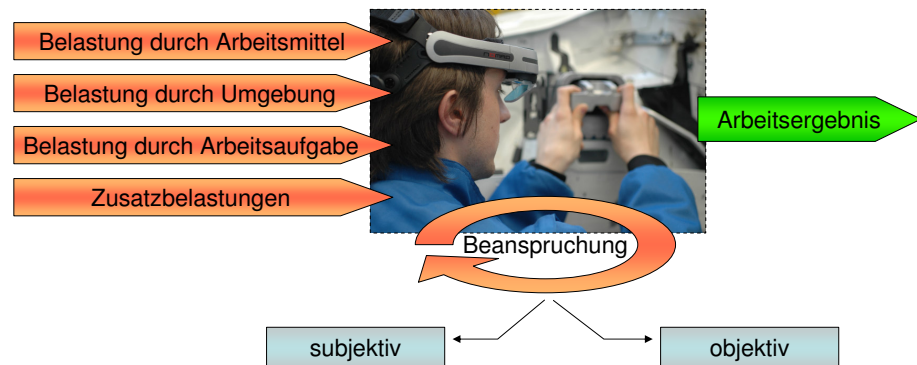
Daher stellt der Beitrag einen Anfang zu nutzerbezogenen Untersuchungen dar, dessen Ergebnisse jedoch für den Bereich AR unter ähnlichen Bedingungen überprüft und ergänzt werden müssen.

Eine der wesentlichen Herausforderungen wurde durch Gabbard et al. und Dünser et al. erkannt: Bisher ist teilweise unklar, welche nutzerbezogenen Fragestellungen überhaupt auf welche Art und Weise untersucht werden sollten [GS08, DGB08]. Gleichzeitig wird durch diese Arbeiten die Bedeutung von Untersuchungen zu nutzerbezogenen Fragestellungen erneut herausgestellt.

Damit mobile AR-Systeme produktiv in der Industrie verwendet werden können, muss eines der wesentlichen Ziele für die Forschung im Bereich AR heute darin bestehen, Erkenntnisse darüber zu erlangen, wie mobile AR-Assistenzsysteme für einen Langzeiteinsatz gestaltet sein müssen.

Nur wenn die Technologie den Nutzer nicht beeinträchtigt, einfach zu bedienen ist und als sinnvoll wahrgenommen wird, kann sie von den Anwendern akzeptiert werden [Dav89]. Dabei ist von besonderer Bedeutung, Systeme nicht zum Selbstzweck für einen Anwendungsbereich zu entwickeln, sondern auch den Anwender im Gesamtsystem zu berücksichtigen (Humanzentrierung [Tal97]). Ziel sollte es sein, AR-Anwendungen so zu gestalten, dass sie von möglichst vielen Personen genutzt werden können, unabhängig von ihrem Alter [JBK<sup>+</sup>04], ihren Fähigkeiten, dem aktuellen Befinden oder Veränderungen der aktuellen Arbeitsumgebung [GRS03]. Eine Möglichkeit zur Gestaltung solcher Systeme besteht darin, vom „schwächsten“ anzunehmenden Mitarbeiter auszugehen und das System speziell auf ihn auszurichten - die restlichen Mitarbeiter werden dann mit diesem System problemlos arbeiten können [Mai07].

Abbildung 3.10: Belastung und Beanspruchung beim Werker



Quelle: Eigener Entwurf frei nach [Fah69]

In einem systemergonomischen Ansatz und unter der Perspektive der Langzeittauglichkeit der Systeme in einem industriellen Umfeld sind verschiedene ineinandergreifende Faktoren bedeutsam, die bisher nur in geringem Maße untersucht wurden [TOBM04]. Allgemein geht es dabei um die Minimierung der psychischen und physischen Mehrbelastung (siehe Abbildung 3.10) durch die Systeme [BUDS05]. Der Werker wird durch äußere Einflüsse belastet, die in ihm eine Beanspruchung auslösen können. Diese Beanspruchungssituation beeinflusst das Arbeitsergebnis. Eine Erfassung der jeweiligen Beanspruchungslage ist durch subjektive und objektive Methoden möglich. Speziell für diese Problemstellung existieren bisher kaum aussagekräftige Untersuchungen, die definieren, ob und in welcher Form sich eine Mehrbelastung für den Nutzer darstellt und wie sie sich auswirkt.

Neben der Beanspruchungsanalyse stellen Themen zur Informationsdarstellung und -wahrnehmung einen weiteren Schwerpunkt dar. Es ist kaum belegt, welche Informationen am besten mithilfe eines HMDs wahrgenommen und verstanden werden sowie zu optimalen Arbeitsergebnissen führen. Bei den heute verfügbaren HMDs besteht das Problem, dass Informationen auf einer

festen Fokalebene dargestellt werden [LCH08], sodass ein ständiges „Umschalten“ zwischen unterschiedlichen Fokalebenen beim Nutzer erforderlich ist. Dies kann zu Beschwerden führen, wenn im Display dargebotene stehende Bilder gleichzeitig zu Kopfbewegungen wahrgenommen werden [HC96]. Viele der heutigen HMDs sind nur monokular ausgeführt, sodass die Information nur vor einem Auge dargeboten wird. Dies wurde teilweise als problematisch erkannt, insbesondere unter Stress und im Dauereinsatz [RH05]. Andere Herausforderungen stellen sich in den Bereichen der Kontrast-, Farb- und Größewahrnehmung [Liv06, LBS09] sodass bisher nicht klar ist, in welcher Form, Farbe und Größe Informationen dargestellt werden sollten [TSM<sup>+</sup>08].

Weiterhin spielen Fragen eine Rolle, die sich damit beschäftigen, wann und in welchem Nutzungskontext welche Informationen eingeblendet [DHS04, SFPK06] und welche Interaktionsmetaphern zum Abrufen der Informationen genutzt werden sollten. Damit der Werker beim Ausführen seiner Tätigkeit auf das Wesentliche konzentriert bleibt und nicht in der Ausführung seiner primären Arbeitsaufgabe gestört wird [Mee01], gilt es zudem, geeignete Interaktionskonzepte zu entwickeln [BUDS05, SH06, Lan08]. Dabei kann es entscheidend für die Qualität der ausgeführten Arbeit sein, dass dem Anwender individuelle Freiheiten in der Arbeitsschrittfolgenfolge gelassen werden [UII06]. Für die Informationsdarstellung ist zu beachten, dass die Art der Darstellung einen starken Einfluss auf Bearbeitungszeiten hat [SFPK06, SK08]. Möglicherweise bevorzugen unterschiedliche Personen auch unterschiedliche Arten der Hilfestellung [SH06, TSM<sup>+</sup>08]. In diesem Zusammenhang wurde bisher die Anpassung des Mediums an individuelle Eigenschaften wie zum Beispiel den Brillenträgerstatus, das Alter, die Kopfform etc. kaum berücksichtigt, obwohl diesen Parametern eine maßgebliche Bedeutung zuerkannt wird.

Neben der ergonomischen Gestaltung der Hard- und Software sind hier auch Fragen zur Arbeitsgestaltung von Bedeutung [RM02, EMER<sup>+</sup>02]. Zur Beantwortung der Fragen, welche virtuelle Information einem Nutzer zu welchem Zeitpunkt wie eingeblendet werden soll, muss grundlegend geklärt werden, wie virtuelle Informationen von einem Nutzer aufgenommen und verarbeitet werden. Dies betrifft perzeptive Faktoren wie beispielsweise Wahrnehmungsleistungen bei Überlagerung von realen und virtuellen Objekten [TSLB05], dem Lesen von Text [SGW<sup>+</sup>01], die Genauigkeit bei der Einschätzung von Größen- und Tiefeninformationen oder auch die Effekte beim Wechsel der Fokussierung zwischen realen und virtuellen Objekten. Dazu gehören auch motorische Prozesse, die bei Blickbewegungen relevant sind [HU07b]. Mit Ausnahme der Tiefenwahrnehmung, die in virtuellen Szenarien bereits als überaus fehlerbehaftet nachgewiesen wurde [LK03, WCCRT04, CRWGT05], stehen entsprechende Untersuchungen aus.

Kognitive Faktoren wie der Grad der Übereinstimmung des mentalen Modells des Nutzers mit dem anvisierten mentalen Modell des Assistenzsystems sind ebenfalls von Belang [Oeh04]. In Bezug auf einen länger andauernden Einsatz müssen perzeptive wie auch kognitive Prozesse und Lerneffekte des Anwenders berücksichtigt werden [SFPK06], so etwa, ob eine möglichst geringe mentale Beanspruchung [TOBM03] tatsächlich im realen Einsatz gewünscht ist (mögliche Unterforderung, Motivationsmangel, Konzentrationsabbau).

Nur wenn der Anwender die Systeme als hilfreich erachtet [Wan06] und darin keine Mehrbelastung sieht, wird er das Potenzial der Technologie optimal nutzen können. Des Weiteren stehen Untersuchungen zu nachwirkenden Effekten auf den Menschen nach Ablegen des Arbeitsmittels „HMD“ noch aus. Motiva-

tionale Faktoren wie die Angenehmheit des Tragens oder die wahrgenommene Nützlichkeit des Medieneinsatzes müssen untersucht werden mit dem Ziel, die Akzeptanz der Systeme deutlich zu verbessern. Bisherige Analysen bei Automobilherstellern bestätigen den dringenden Bedarf, nachzuweisen, dass der Einsatz mobiler AR-Technologien die Leistungsbereitschaft der Anwender nicht negativ beeinträchtigt.

### 3.5 Zusammenfassung und Schwerpunktauswahl

Die Forschungsbereiche der mobilen Augmented Reality wurden für die vorliegende Arbeit in die drei Bereiche „Technische Aspekte“, „Anwendungen“ und „nutzerbezogene Aspekte“ untergliedert. Diese sind jeweils unterschiedlich stark erforscht. Für den produktiven industriellen Einsatz mobiler und stationärer AR wird in den in Tabelle 3.2 dargestellten Bereichen aktuell unterschiedlich starker Forschungs- und Entwicklungsbedarf eingeschätzt [BTP08]. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt dabei auf den **mobilen AR-Technologien**.

Tabelle 3.2: Einschätzung des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in verschiedenen Bereichen der mobilen und stationären AR [BTP08]

Forschungsbereich Handlungsbedarf	(2008)		Legende
	Mobil	Stationär	
<i>Anwendungen</i>			sehr hoch ++
Anforderungsspezifikation	++	+	hoch +
Prozessintegration	+	++	neutral o
<i>Technologien</i>			gering -
Erfassungssysteme	+	o	sehr gering --
Verarbeitungssysteme	+	--	
Softwareschnittstellen	+	+	
Algorithmen	++	o	
Ausgabegeräte	++	-	
<i>Nutzerbezogene Aspekte</i>			
Ergonomie	++	o	
Usability	++	+	

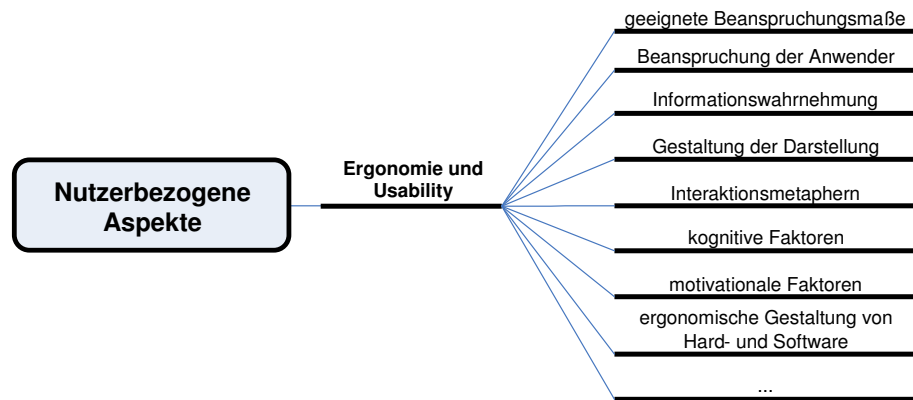
Stand: Dezember 2008

Die Forschungsarbeiten in den Bereichen der anwendungsorientierten und technischen Fragestellungen sind inzwischen so weit fortgeschritten, dass prototypische mobile AR-Systeme erstellt werden können [MMT<sup>+</sup>08]. Dennoch besteht auf der Seite der Anwendungen weiterhin Forschungsbedarf speziell im Bereich der Anforderungsspezifikationen, auf der Seite der Technologien sind besonders die Entwicklung effizienterer Algorithmen und verbesserter Ausgabegeräte von Belang.

Neben diesen Bereichen, in denen grundsätzliche Fragestellungen bereits erkannt wurden und aktuell zum Teil schon in Bearbeitung sind, ist der Bereich der nutzerbezogenen Aspekte noch weitgehend unerforscht. Folgende Fragestellungen müssen beantwortet sein, um die nutzergerechte Auslegung mobiler AR-Systeme zu ermöglichen:

- Welche Auswirkungen (physisch und motivational) hat der länger andauernde Einsatz mobiler AR-Technologien auf den Anwender?
- Wie muss ein mobiles AR-System gestaltet sein, damit es den Anwender effizient unterstützt?

Abbildung 3.11: Identifizierte Schwerpunkte zu offenen nutzerbezogenen Fragestellungen für den Bereich der AR



Quelle: Eigener Entwurf

Abbildung 3.11 stellt die in der zuvor beschriebenen Recherche identifizierten offenen Punkte zu nutzerbezogenen Fragestellungen dar. Dabei wurde keine spezielle Einordnung in die Bereiche „Ergonomie“ und „Usability“ (vgl. Tabelle 3.2) vorgenommen. Es wird offensichtlich, dass viele Teilaspekte dieses Bereichs Berührungspunkte mit den Anwendungen und technischen Aspekten haben.

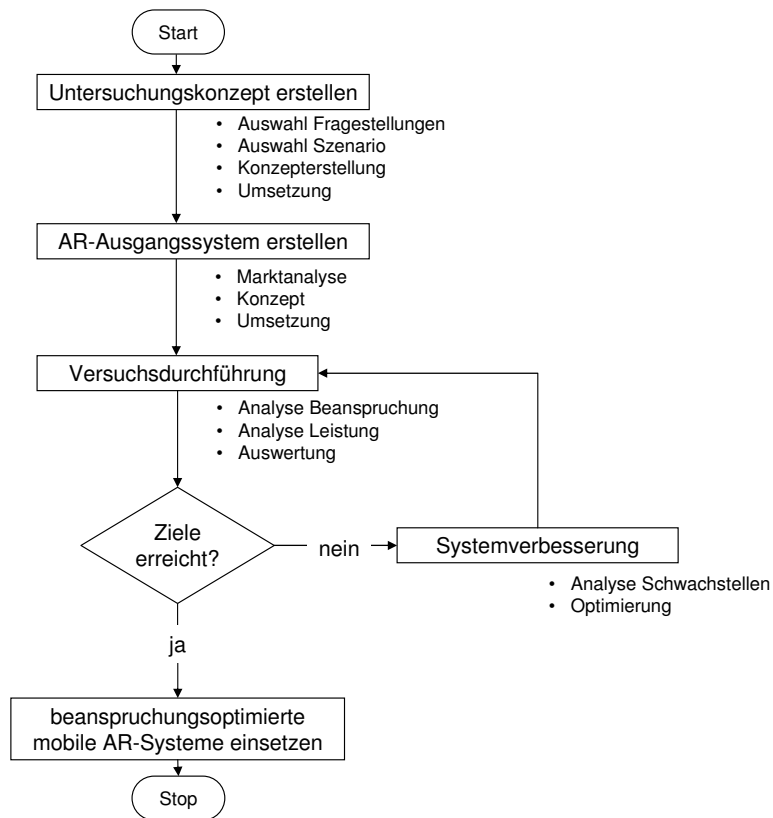
Als zunächst wesentliche Punkte sind geeignete Beanspruchungsmaße zu finden, sodass aus Belastungen der Anwender, die durch den Einsatz eines mobilen AR-Systems entstehen, die resultierende Beanspruchung gemessen und vergleichbar gemacht werden kann. Daneben muss der Prozess der Informationswahrnehmung beim Einsatz von AR-Displays untersucht werden. Das Ziel ist es hier, optimale Arten der Informationsdarstellung zu ermitteln. Aufbauend auf Ergebnissen dieser Untersuchungen sollten danach weitere Arbeiten zur Interaktion, zu kognitiven und motivationalen Faktoren sowie zur Gestaltung von Hard- und Software folgen.

Durch die vielen zuvor benannten nutzerbezogenen Fragestellungen ist eine isolierte Betrachtung aus dem Blickwinkel der Ingenieurinformatik nicht ausreichend. Daher ist ein enges Zusammenspiel mit Partnern aus Disziplinen der Psychologie und Medizin unbedingt notwendig.

Für Fragestellungen zur Belastung und Beanspruchung der Anwender eines AR-System eignet sich die Zusammenarbeit mit Arbeitsmedizinern. Die *Arbeitsmedizin* untersucht Wechselbeziehungen zwischen Arbeit / Beruf und dem Menschen, also das körperliche, psychologische und soziale Wohlbefinden im Kontext der Arbeit [Pfi08, Sch06a]. Dabei liegen Schwerpunkte überwiegend in der Prävention (Primärprävention, Vorsorgeuntersuchungen und Rehabilitation), um Berufskrankheiten und arbeitsbedingte Krankheiten zu vermeiden. Ein Überblick über den Stand der Forschung bietet eine Publikation der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) [Sch06a].

Themenschwerpunkte, die die Bereiche der Informationsdarstellung und Informationsverarbeitung betreffen, können in Zusammenarbeit mit Partnern der Wahrnehmungspsychologie bearbeitet werden. Die *Wahrnehmungspsychologie* untersucht, wie beim Menschen aus den Informationen, die er mit den Sinnesorganen aufnimmt, zusammen mit der neuronalen Verarbeitung die subjektive Wahrnehmung entsteht [Gol97]. Berührungspunkte gibt es mit weiteren Disziplinen der Psychologie, so zum Beispiel mit der Sozialpsychologie, der Entwicklungspsychologie, der angewandten Kognitionsforschung und den Neurowissenschaften.

Abbildung 3.12: Vorgehensplan zur Untersuchung nutzerbezogener Parameter an einem Referenzarbeitsplatz



Quelle: Eigener Entwurf

Eine mögliche Vorgehensweise zur Durchführung von Untersuchungen zu nutzerbezogenen Aspekten ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Dabei gilt es zunächst, ein geeignetes Untersuchungskonzept zu erstellen, durch welches ausgewählte Fragestellungen an einem Referenzversuchsbereich untersucht werden können. Für die Durchführung der Untersuchungen ist es erforderlich, ein geeignetes AR-System zu erstellen, das im Versuchsbereich eingesetzt und so lange sukzessive verbessert wird, bis die zu Anfang ausgewählten Fragestellungen im gewünschten Maß bearbeitet wurden. Durch die Vielzahl und Komplexität der recherchierten offenen nutzerbezogenen Fragestellungen können jedoch nicht alle von ihnen im Rahmen der vorliegenden Dissertation bearbeitet werden. Außerdem kommt hinzu, dass die nutzerbezogenen Fragestellungen oftmals nicht losgelöst von den technischen oder anwendungsbezogenen bearbeitet werden können.

Für die vorliegende Arbeit wurde das Durchlaufen einer Schleife dieses Vorgehensplanes ausgewählt. Für die Bearbeitung von Fragestellungen zur Belastung / Beanspruchung der Anwender und zu Effekten im Langzeiteinsatz existieren bisher kaum grundlegende Untersuchungen. Diese sind jedoch notwendig, wenn die mobile AR-Technologie produktiv eingesetzt werden soll, um abschätzen zu können, wie ein mobiles AR-System für den industriellen Dauereinsatz gestaltet sein muss. Es wird ein Untersuchungskonzept mit einer geeigneten Versuchsumgebung und einem daran einsetzbaren mobilen AR-Ausgangssystem erstellt, um daran Untersuchungen durchzuführen:

1. Durchführung einer Untersuchung zum Langzeiteinsatz des erstellten mobilen AR-Systems an der Versuchsumgebung
2. Anschließende Systemverbesserung eines technischen Aspekts des eingesetzten AR-Systems

Der folgende Verlauf der Arbeit beschreibt demnach die Erstellung eines Untersuchungskonzeptes, eines AR-Ausgangssystems, die Durchführung einer ersten Untersuchung zum Langzeiteinsatz mobiler AR sowie eine anschließende Systemverbesserung am Beispiel der Optimierung der See-Through-Kalibrierung.



---

# 4

## Untersuchung zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz der AR-Technologie

---

### 4.1 Einleitung und Ziele

In Kapitel 3.4 wurde deutlich, dass Untersuchungen zum Langzeiteinsatz mobiler AR-Technologien bisher ausstehen und dadurch die nutzergerechte Auslegung von AR-Systemen kaum möglich ist.

Um vergleichbare und reproduzierbare Untersuchungsergebnisse zum Langzeiteinsatz mobiler AR-Technologien zu erhalten, ist der Aufbau einer geeigneten Versuchsumgebung, eines daran eingesetzten mobilen AR-Systems sowie die Durchführung angemessener Untersuchungen erforderlich. Dies muss im Gegensatz zu bereits durchgeführten Evaluierungen (vgl. [PWS05]) an einem Versuchsbereich geschehen, der dem zukünftigen realen Einsatz mobiler AR-Displays nahe kommt. Diese Themen sind Gegenstand des aktuellen Kapitels.

Die Auswirkungen auf den Anwender beim Langzeiteinsatz mobiler AR setzen sich aus unterschiedlichen Ursachen zusammen (siehe Kapitel 3.4), daher ist es zunächst notwendig, kritische Variablen für personenbezogene Parameter zu finden [KFTM07]. Unterschiedliche sowohl objektive als auch subjektive Messverfahren müssen mit verschiedenen Skalen eingesetzt werden, um ein möglichst breites Spektrum von Einflussgrößen zu erfassen.

Dabei ist eine Möglichkeit, die Anzahl von Confoundern (Störgrößen) zu verringern und methodische Randbedingungen zu klären, zunächst homogene Versuchsgruppen („junge Gesunde“) bei einer mittleren Tragedauer von 2 bis 4 Stunden einzusetzen. Nach diesen ersten Untersuchungen können später weitere Langzeituntersuchungen folgen, welche die Parameter weiter analysieren, die sich als kritisch und bedeutend herausgestellt haben.



Folgende Ziele sollten durch das nachfolgend beschriebene Vorgehen erreicht werden:

1. Auswahl geeigneter Beanspruchungsmaße für Untersuchungen zum Langzeiteinsatz der AR
2. Auswahl und Realisierung eines geeigneten Untersuchungsszenarios
3. Vergleich der Beanspruchung beim Langzeiteinsatz mit und ohne AR-Unterstützung am ausgewählten Untersuchungsszenario
4. Analyse der Arbeitsqualität in Relation zur
  - Zeit und
  - momentanen Beanspruchung.

Die Realisierung dieser Ziele wird in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

---

## 4.2 Untersuchungsstrategie

Zur Durchführung der Untersuchungen sind drei Vorgehensweisen möglich:

1. Eine erste Möglichkeit stellt die empirische Evaluation an einem ausgewählten realen Arbeitsplatz zum Beispiel in einem Produktionsumfeld dar (Feldversuch). Durch das realistische Umfeld können Situationen auftreten, die zu Beginn der Tests noch nicht offensichtlich waren und dadurch möglicherweise zusätzliche Aspekte untersucht werden. Doch durch dieses nicht vollständig kontrollierbare Umfeld ist es kaum möglich, nötige Rahmenbedingungen konsequent umzusetzen und einzuhalten. Daneben birgt die Integration der zu testenden Systeme und Methoden in das bestehende Produktionsumfeld sowie die tatsächliche Durchführung der Untersuchungen ein Gefährdungspotenzial für die laufende Produktion. Sollten Systeme ausfallen oder die Anwender mit dem System Probleme haben, so kann dies unter Umständen eine Unterbrechung der laufenden Produktion bedeuten und dadurch ungeplante Kosten verursachen.
2. Eine zweite Variante ist die Durchführung empirischer Untersuchungen an einem speziell erstellten „Referenzarbeitsplatz“ im Labor. Dadurch können unter definierten gleichen und weitgehend gesicherten Rahmenbedingungen Untersuchungen stattfinden. Sollten Probleme bei den Anwendern auftreten, kann der aktuelle Versuch ohne Probleme abgebrochen und später mit oder ohne Änderungen wiederholt werden. Durch das Herauslösen des Versuchs aus dem realen Produktionsumfeld sind die zu erwartenden Befunde jedoch nicht 1:1 auf den realen Arbeitsalltag übertragbar. Daher müssen nach Untersuchungen im Labor zusätzlich ausgewählte Feldtests zur Validierung durchgeführt werden. Durch die zuvor ermittelten Ergebnisse aus den Laborversuchen wird die Gefahr überschaubar, die dieser Test im realen Produktionsumfeld birgt.
3. Als dritte Option können kognitive und physische Modelle analytisch angewandt werden, die detaillierte quantitative Aus- und Vorhersagen zu kognitiven und physischen Aspekten erlauben und somit theoretische

Untersuchungen ermöglichen [DBDM95, HU07a]. Dies würde bedeuten, innerhalb bestimmter Grenzen alle Parameter von Mitarbeitern und Arbeitsumfeld theoretisch anzunehmen und so Schritt für Schritt einzelne Situationen nachzustellen. Da jedoch erforderliche Wahrnehmungs- und Interaktionsstrategien [HU07a] sowie biologische Faktoren beim Langzeiteinsatz der AR bisher unbekannt sind, können solche kognitiven und physischen Modelle nicht mit dem erforderlichen Umfang erstellt werden. Ein weiteres Problem liegt in der bisherigen Unvollständigkeit kognitiver Theorien [SCZ05].

Tabelle 4.1: Anforderungen an die Untersuchungen

	Feldversuch	Referenzarbeitsplatz	theoretische Modelle
valide & übertragbare Ergebnisse	ja	bedingt	nein, da mangelnde Modelle
reproduzierbare Ergebnisse	sehr eingeschränkt	ja	ja
Parameter einfach modifizierbar	nein	ja	ja
Langzeituntersuchungen	ja	ja	nein, da mangelnde Langzeitmodelle
geringer Aufwand bei Durchführung	nein	ja	ja
keine Folgen für laufende Produktion	nein	ja	ja

Tabelle 4.1 stellt Anforderungen dar, die an die Untersuchungen gestellt werden. Daraus wird ersichtlich, dass nur durch Versuche an einem Referenzarbeitsplatz reproduzierbare Ergebnisse erreicht werden können, wobei alle Parameter vergleichsweise einfach modifizierbar sind und ein geringer Durchführungsaufwand nötig ist. Folgen für die laufende Produktion entstehen im Laborversuch nicht. Die Laborversuche müssen jedoch durch nachfolgende Untersuchungen in der Praxis verifiziert werden.

Daher besteht ein Ziel der vorliegenden Arbeit darin, ein geeignetes Versuchskonzept zu entwerfen und den Versuchsbereich aufzubauen. Für diesen Referenzarbeitsplatz muss danach ein erstes mobiles AR-System als Ausgangsbasis für die anschließenden Tests geplant und umgesetzt werden, um daraus Kenntnisse über grundlegende Herausforderungen und Auswirkungen auf den Menschen zu gewinnen. Nach diesen ersten Untersuchungen kann das System weiter verbessert sowie unterschiedliche Displays und Methoden integriert werden, um weitere Evaluierungen mit einem optimierten System durchzuführen.

### 4.3 Referenzarbeitsplatz

Zur Untersuchung nutzerbezogener Aspekte beim Langzeiteinsatz der mobilen AR-Technologie ist es erforderlich, zunächst Versuche in einem kontrollierten Laborumfeld durchzuführen, um später die Ergebnisse dieser Unter-

suchungen in Feldtests zu verifizieren. Dieses Laborumfeld stellt somit den „Referenzarbeitsplatz“ dar, an dem unter realistischen und reproduzierbar veränderlichen Arbeitsbedingungen neben ingenieurwissenschaftlichen auch psychologische und arbeitsmedizinische Fragestellungen untersucht werden können, um Erkenntnisse über Langzeiteffekte (perzeptiv, kognitiv, motivational, physisch) zu gewinnen. Solche Modell- oder Referenzarbeitsplätze werden in unterschiedlichen Bereichen unter anderem für psychophysiologische Untersuchungen sowie für Ergonomie-Analysen [GCGM03, CHHES08] genutzt.

#### 4.3.1 Rahmenbedingungen für den Referenzarbeitsplatz

Um den Referenzarbeitsplatz zu erstellen, muss eine Tätigkeit oder ein Szenario ausgewählt werden, welches für die geplanten Untersuchungen geeignet ist. Da am Referenzarbeitsplatz mobile AR-Systeme betrieben werden sollen, müssen zunächst Anforderungen an den Einsatz eines mobilen AR-Systems aufgestellt werden. Es bestehen folgende allgemeine Anforderungen an einen durch mobile AR unterstützten Referenzarbeitsplatz:

- Arbeitsplatz mit hohem Anteil von Suchtätigkeiten (z.B. Suche nach Verbau- oder Lagerorten)
- Überwiegender Einsatz beider Hände
- Informationstechnische Unterstützung erforderlich (Such- oder Prüftätigkeiten)
- Komplexe Arbeitsaufgaben
- Geringe Wiederholrate einzelner Arbeitsaufgaben
- Hoher Trainingsaufwand

Anhang A.1 stellt zusätzlich Anforderungen unterteilt in die Bereiche „Software“, „Hardware am Nutzer“ und „Arbeitsplatz“ und dar, die durch ein Experteninterview mit Produktionsplanern und AR-Experten ermittelt wurden. Für den hier zu erstellenden Referenzarbeitsplatz sind nicht die Anforderungen an Hard- und Software ausschlaggebend, sondern die Anforderungen an den Arbeitsplatz selbst:

- freie Beweglichkeit innerhalb eines definierten Arbeitsraumes
- Notfallplan
- Wirtschaftlichkeit (Amortisation der Investitionskosten des AR-Systems innerhalb eines Jahres)

Die freie Beweglichkeit innerhalb eines Arbeitsraumes ist erforderlich, damit der Werker den Arbeitsprozess ohne Behinderung durch das AR-System ausführen kann. Kabel, Geräte und Geräteabdeckungen müssen so am Werker positioniert sein, dass die freie Beweglichkeit gewährleistet ist. Der Notfallplan ist eine Anforderung aus der Industrie, die bedeutet, dass der Arbeitsprozess möglichst unterbrechungsfrei fortgeführt werden kann, wenn das AR-System ausfallen sollte. So ist bei Ausfall des AR-Systems der Austausch defekter Geräte oder sogar der Austausch der Technologie erforderlich, indem Anweisungen zum Beispiel über einen Monitor anstelle des HMDs ausgegeben werden.

Die Wirtschaftlichkeit der AR-Technologie wird in der Industrie kontinuierlich analysiert. Aus internen Studien geht hervor, welche Applikationen Unterstützungspotenzial bieten und ob sich die notwendigen Investitionskosten innerhalb eines festgelegten Zeitraumes amortisieren.

Am Referenzarbeitsplatz ist besonders die Forderung nach einer „freien Beweglichkeit innerhalb eines definierten Arbeitsraumes“ entscheidend, da verhindert werden muss, dass der Benutzer durch die AR-Technologie in der Ausübung seiner Tätigkeit behindert wird. Die Wirtschaftlichkeits- und Notfallplan-Anforderungen bleiben aufgrund des nicht-produktiven Charakters des Referenzarbeitsplatzes hier bedeutungslos.

Generell lassen sich manuelle Arbeiten nach dem Rasmussen-Modell menschlicher Leistung in fertigkeitbasierte, regelbasierte und wissensbasierte Tätigkeiten differenzieren [RP97]. Fertigkeitbasiertes Verhalten stellt nicht bewusst regulierte, automatisch ablaufende Tätigkeiten dar. Bei regelbasierten Tätigkeiten werden bekannte Regeln auf bestimmte Situationen angewandt. Wissensbasierte Tätigkeiten hingegen verlangen einen höheren Grad an Eigeninitiative einer Person, da sie eigenständig Entscheidungen über Details der Aufgabenausführung treffen muss, die in keinem für die konkrete Aufgabe zutreffenden Regelwerk festgeschrieben sind. Besonders regel- und wissensbasierte Tätigkeiten sind für eine AR-Unterstützung geeignet [Wie03], sodass der Referenzarbeitsplatz keine stets gleichartig ablaufenden, „nebenbei“ durchführbaren Handlungen abbilden darf.

Schließlich wurden durch die Befragung von AR-Experten und Produktionsplanern sowie in Absprache mit Partnern der Arbeitsmedizin unter Nutzung der zuvor genannten Anforderungen folgende für den hier zu erstellenden Referenzarbeitsplatz ausgewählt:

- Allgemein
  - Arbeitsplatz mit hohem Anteil von Suchtätigkeiten
  - überwiegender Einsatz beider Hände
  - informationstechnische Unterstützung erforderlich
  - komplexe Arbeitsaufgaben
  - geringe Wiederholrate einzelner Arbeitsaufgaben
  - freie Beweglichkeit innerhalb des Arbeitsraumes
  - Umsetzung regel- oder wissensbasierter Tätigkeiten
- Bezogen auf Versuchsdurchführung
  - Geringer Aufwand für die Versuchsdurchführung
  - Langzeit-Versuche ermöglichen (4 oder mehr Stunden)
  - Möglichkeit zum Test verschiedener Displays und Darstellungsmethoden
  - Tests auch mit verschiedenen nicht-AR-basierten Systemen
  - einfache Wiederherstellbarkeit des Ausgangszustands
  - Messen personenabhängiger Parameter
  - definierte externe Parameter (Beleuchtung, Geräuschkulisse, Mikroklima)
  - Versuchsbereich abgeschlossen gegenüber äußeren Störeinflüssen

- eine dem realen industriellen Einsatz ähnliche Belastung der Probanden und der AR-Systeme
- Einsatz sowohl von technischem Fachpersonal als auch von nicht-Fachpersonal als Probanden
- Messen von Bearbeitungsqualität und Bearbeitungsdauer

Diese dienen als Basis, um nachfolgend eine Tätigkeit für den Referenzarbeitsplatz auszuwählen.

#### 4.3.2 Auswahl einer Tätigkeit

Für die Festlegung eines Szenarios, welches als Referenzarbeitsplatz umgesetzt werden soll, kann grundsätzlich jeder Bereich aus Kapitel 3.2 in Betracht gezogen werden, solange die konkrete Arbeitsaufgabe mit den zuvor genannten Anforderungen an den Referenzarbeitsplatz realisierbar ist. Dabei ist zu beachten, dass in den möglichen Bereichen sowohl die Arbeit mit einem AR-System als auch ohne für alle Probanden durchführbar sein muss, damit die Ergebnisse der Arbeit mit und ohne AR-System vergleichbar sind. Da die oben genannten Anforderungen insbesondere auf die Kommissionierung, Montage / Demontage und die Qualitätssicherung zutreffen und diese Tätigkeiten des regel- oder wissensbasierten Verhaltens darstellen [Wie03], werden mögliche Anwendungen in diesen Bereichen nachfolgend näher betrachtet.

#### Kommissionierung

Die Kommissionierung ist eine Methode der Materialbereitstellung, bei der auftragsbezogen Warenkörbe zusammengestellt werden (Abbildung 4.1). Dies geschieht in der Automobilfertigung überwiegend manuell aufgrund der Flexibilität des Menschen [Lol02]. Der *Kommissionierer*<sup>8</sup> bekommt einen Auftrag, geht durch ein Warenlager und entnimmt entsprechend der Auftragsliste Objekte vom Lagerplatz. Diese Objekte werden in einem Kommissionierbehälter (Warenkorb) abgelegt. Danach werden der Warenkorb und die darin abgelegten Objekte übergeben und der nächste Auftrag ausgeführt. In der Automobilindustrie wird die Kommissionierung dafür genutzt, Fahrzeugteile, die für ein einzelnes kundenspezifisches Fahrzeug benötigt werden, aus dem Lager zu entnehmen und den am Fahrzeug arbeitenden Werkern zugänglich zu machen [Tüm05]. Der Warenkorb begleitet das zugeordnete Fahrzeug über einen längeren Abschnitt entlang der Fertigungsstrecke und enthält notwendige Bauteile für die einzelnen Montageprozesse. Das Potenzial der AR zur Verbesserung von Kommissioniertätigkeiten wurde bereits mehrfach wissenschaftlich belegt [Alt02, GBRS09].

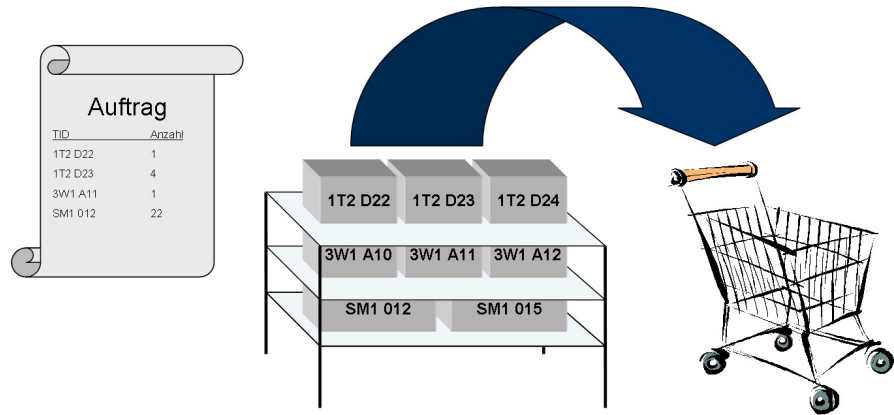
Für die Umsetzung als Referenzarbeitsplatz ist ein Aufbau mehrerer Regale denkbar, in welchem dem Kommissionierer mittels AR die Entnahmehinweise visualisiert werden. Der Proband kann durch Navigationshinweise zum korrekten Regal geführt und durch einen weiteren Hinweis zum korrekten Entnahmefach geleitet werden.

#### Montage / Demontage

Ein weiteres mögliches Szenario stellt die Montage dar. Die Montage in der industriellen Fertigung bezeichnet den planmäßigen Zusammenbau von Bauteilen / Baugruppen zu Erzeugnissen. In der Montage und im Service be-

<sup>8</sup> die Person, die den Kommissionierauftrag ausführt

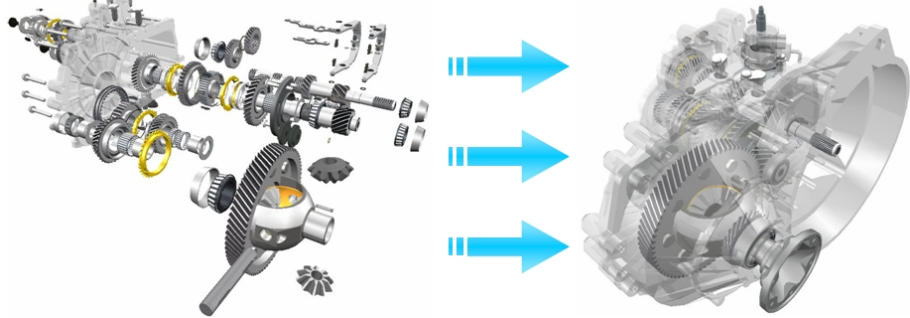
Abbildung 4.1: Schema der Kommissionierung



Quelle: Eigener Entwurf

kommt der Werker Anweisungen, welche Bauteile in welcher Art und Weise montiert / demontiert werden sollen. Eines der größten Potenziale der AR zur Kosten- und Fehlerreduktion wird für diesen Einsatzbereich erwartet [WOSL01, TOBM03, TOBM04].

Abbildung 4.2: Getriebe in Einzelteilen und zusammengefügt



Quelle: Fraunhofer IFF

Folgende Realisierung ist hier denkbar: Einem Nutzer werden Montageanweisungen an einem in Einzelteilen vorliegenden PKW-Getriebe durch mobile AR-Systeme visualisiert. Die zu verwendenden Bauteile ähneln sich teilweise sehr stark, teilweise sind sie sehr unterschiedlich (Abbildung 4.2).

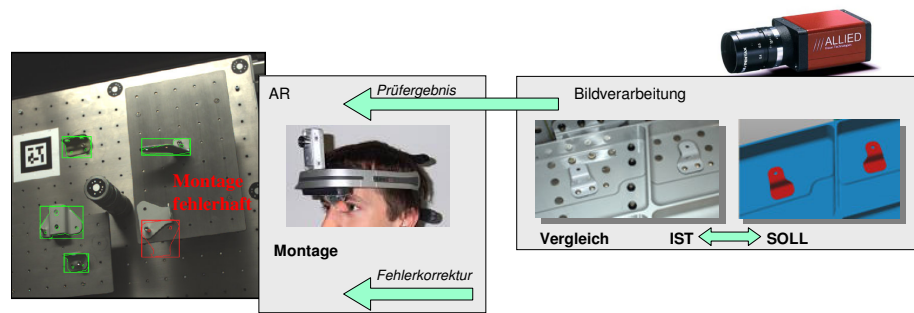
### Qualitätssicherung

Ein drittes Szenario ist die Qualitätssicherung. Die Qualitätssicherung eines industriellen Prozesses wird in diesem Zusammenhang als Überprüfung, ob alle Qualitätsanforderungen erfüllt wurden, mit anschließender Fehlerkorrektur aufgefasst. Sie erfolgt nach einem komplexen Montageprozess, um zu überprüfen, ob alle Montageelemente korrekt montiert wurden. Ein Vorteil eines solchen AR-gestützten Qualitätssicherungssystems liegt darin, dass einerseits durch die AR eine Unterstützung beim Auffinden des Fehlers und andererseits gleichzeitig die notwendigen Maßnahmen zu dessen Beseitigung eingeblendet werden können [TSBM08].

Ein AR-basiertes Qualitätssicherungssystem könnte so aussehen, dass ein fertig montiertes technisches Produkt vorliegt und dem Nutzer verschiedene Hinweise eingeblendet werden, wo und wie Kontrollen am Produkt durchzuführen sind [OMN<sup>+</sup>08]. Wenn der Werker oder das System einen Fehler erkennt, kön-



Abbildung 4.3: Schema einer möglichen AR-gestützten Qualitätssicherung



Quelle: Eigener Entwurf

nen entsprechende Montage / Demontagehinweise zur Fehlerkorrektur eingeblendet werden (Abbildung 4.3).

### Bewertung

Diese drei Szenarien sind in Tabelle 4.2 hinsichtlich der Anforderungen an den Referenzarbeitsplatz gegenübergestellt, um eine Tätigkeit für die Umsetzung am Referenzarbeitsplatz auszuwählen. Dabei sind besonders die auf die Versuchsdurchführung bezogenen Anforderungen relevant.

Der Aufwand der Versuchsdurchführung in einem Kommissionierbereich ist vergleichsweise gering, da die Versuchsteilnehmer relativ autark und ohne ständige Überwachung durch die Versuchsbetreuung arbeiten können. Bei den beiden anderen Szenarien ist dies schwieriger, da die Versuchsbetreuung stets jeden Arbeitsschritt begleiten muss, um zu verhindern, dass durch einen Fehler weitere Folgefehler entstehen, die gegebenenfalls sogar den weiteren Versuchsablauf behindern können. An allen drei Szenarien sind Langzeituntersuchungen möglich, da sie sich so gestalten lassen, dass sehr viele Einzelaufgaben durchgeführt werden müssen. Bei der Montage bedeutet das, dass mindestens zwei Montageobjekte verfügbar sein müssen, sodass nach Fertigstellung des ersten Objektes die Montage am zweiten Objekt beginnen kann, während die Versuchsbetreuung am ersten Objekt den Ausgangszustand wieder herstellt. An allen Szenarien können unterschiedliche Displays, Darstellungsarten und nicht-AR-Systeme getestet werden. Die Herstellung des Ausgangszustands ist bei allen Szenarien aufwendig, doch lässt sich der Aufwand im Bereich der Kommissionierung durch unterstützende Technologie (Barcodes, Radio Frequency Identification (RFID)) verringern. An allen Szenarien können personenabhängige Parameter erfasst, einheitliche externe Parameter herbeigeführt und der Versuchsbereich gegen äußere Störeinflüsse abgesichert werden. Die Belastung der Probanden kann je nach Umsetzung bei allen Szenarien realistisch sein, wobei bei der Kommissionierung hohe Laufwege entstehen. Gleiches gilt für die Belastung der Versuchshardware. Bei der Qualitätssicherung und Montage kann ein Proband, der nicht mit der Durchführung der Arbeiten vertraut ist, aufgrund der mangelnden fachlichen / handwerklichen Ausbildung nicht in einer Kontrollgruppe eingesetzt werden. Im Bereich der Kommissionierung ist dies jedoch möglich. Das Messen der Bearbeitungsqualität ist bei der Montage und Qualitätssicherung verglichen mit der Kommissionierung aufwendiger, da Fehler leichter übersehen und Folgefehler entstehen können [OMN<sup>+</sup>08]. Bei der Kommissionierung hingegen lässt sich die Erfassung der Bearbeitungsqualität automatisieren (vgl. Kapitel 4.3.3). Die Summe der einzelnen Spalten ergibt, dass sich für die Errichtung eines Referenzarbeitsplatzes ein Kommissionierszenario am besten eignet.

*Tabelle 4.2: Beurteilung der Szenarien zur Auswahl eines Anwendungsfalls für den Referenzarbeitsplatz Anhand der für die Versuchsdurchführung relevanten Anforderungen*

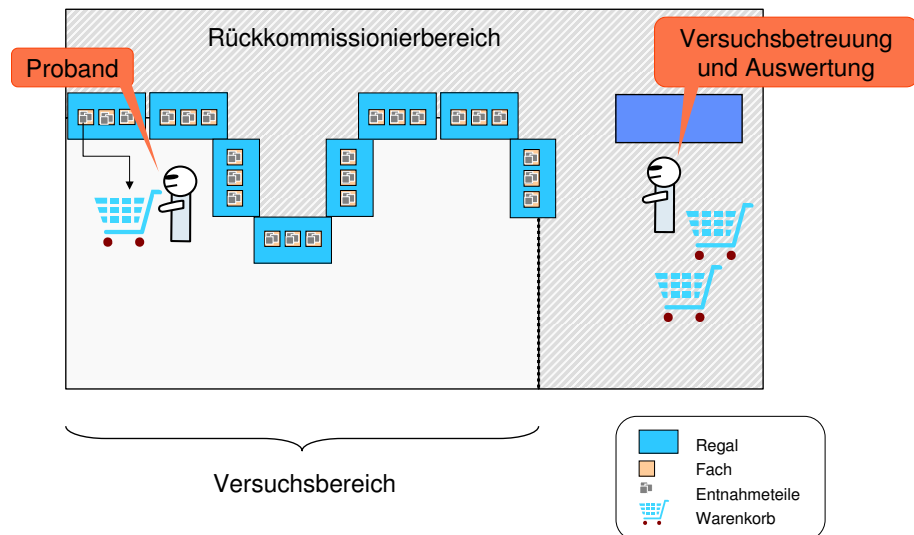
Kriterium	Kommissionierung	Montage	Qualitätssicherung
Geringer Aufwand für Versuchsdurchführung	+1	0	0
Langzeit-Probandenversuche mit bis zu 4 Stunden Dauer	+1	+1	+1
Test verschiedener Displays	+1	+1	+1
Test verschiedener Darstellungsarten	+1	+1	+1
Tests auch mit verschiedenen nicht-AR-basierten Systemen	+1	+1	+1
Einfach herstellbarer Ausgangszustand	0	-1	-1
Messen personenbezogener Parameter	+1	+1	+1
Definierte externe Parameter	+1	+1	+1
Versuchsbereich abgeschlossen gegenüber äußeren Störeinflüssen	+1	+1	+1
Dem realen industriellen Einsatz ähnliche Belastung des Probanden	+1	+1	+1
Dem realen industriellen Einsatz ähnliche Belastung der Versuchshardware	+1	+1	+1
Einsatz sowohl von technischem Fachpersonal als auch von nicht-Fachpersonal als Probanden	+1	-1	-1
Messen von Bearbeitungsqualität und -dauer	+1	0	0
<b>Summe:</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>7</b>



### 4.3.3 Konzept der empirischen Evaluation

Am ausgewählten Referenzarbeitsplatz sollen experimentell nutzerbezogene Fragestellungen hinsichtlich der Auswirkungen der mobilen AR-Technologie auf den Nutzer im Langzeiteinsatz untersucht werden. Dafür ist es erforderlich, dass Personen die AR-Technologie in diesem Referenzarbeitsplatz nutzen, während qualitative Daten zur Arbeitsleistung sowie subjektive und objektive nutzerbezogene Parameter gemessen und diese mit Werten beim Einsatz von nicht-AR-Systemen verglichen werden.

Abbildung 4.4: Entwurf eines Layouts des Versuchsaufbaus



Quelle: Eigener Entwurf

Aufbauend auf den zuvor festgelegten Anforderungen wurde am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Referenzarbeitsplatz in Form eines Kommissionierbereichs zur Durchführung von Langzeituntersuchungen errichtet. Verschiedene Regale stehen im Versuchsbereich und enthalten Fächer, in denen zu entnehmende Teile lagern. Auf einer Seite des Versuchsbereiches wird der Versuch durchgeführt, indem ein Proband kommissioniert, auf der anderen Seite kann ein Rückkommissionierer das Lager wieder befüllen<sup>9</sup>. Abbildung 4.4 stellt schematisch das Layout des erstellten Versuchsbereiches dar.

Der Referenzarbeitsplatz besteht aus acht Regalen mit insgesamt 58 Fächern mit jeweils 10 Teilen. In jedem der Fächer lagern sortenrein gleichartige Teile mit einer Teilenummer, die ähnlich zu realen Teilenummern in der Automobilindustrie aus einer Buchstaben-Zahlen-Kombination besteht. Die Teilenummern sind sich oft sehr ähnlich, sodass gleiche Sequenzen mit vereinzelt anderen Zahlen / Buchstaben an verschiedenen Orten in den Regalen lagern. Ähnliche Teilenummern befinden sich sowohl im gleichen Regal als auch in anderen Regalen. Jedes der Teile ist mit einem quadratischen RFID-Smartlabel (13.56 MHz, ca. 55 mm Kantenlänge) versehen, welches eindeutig einem festen Fach zugeordnet ist und per Lesegerät (Casio DT-X10) ausgelesen werden kann. Die Teile sind durch ihre Form nicht voneinander zu unterscheiden, um dadurch auszuschließen, dass die Teileart die Arbeitsleistung beeinflusst.

Unter jedem Fach sind zudem optische Marker (65 mm Kantenlänge) für das

<sup>9</sup> Da in einem theoretischen Fall in den geplanten 4 Stunden Versuchsdauer bis zu 2400 Teile umgeschlagen werden können [Tüm06], ist eine parallel zum Versuch ablaufende Rückkommissionierung notwendig, um die Menge der im Lager vorzuhaltenden Teile zu reduzieren.

Abbildung 4.5: Komponenten des Referenzarbeitsplatzes



Kommissionierbereich mit Wagen zur Teileablage



RFID-Lesegerät



Werkerassistenz  
(AR-System)



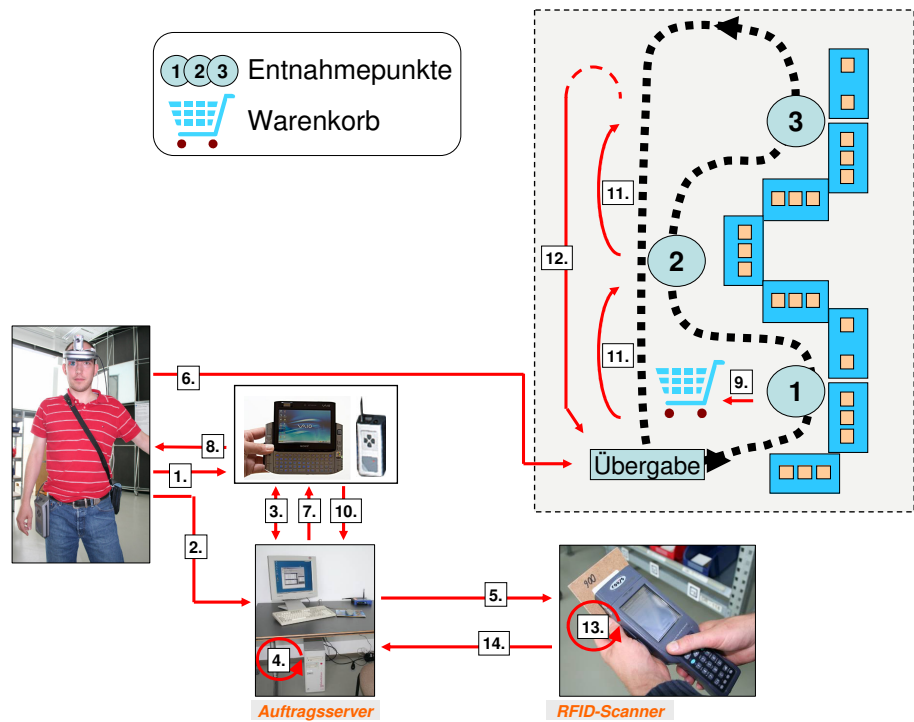
Auftragsgenerierung

Quelle: Eigener Entwurf

AR-Tracking angebracht und eingemessen. Das optische Markertracking bietet den Vorteil einer ausgereiften Robustheit und der Verfügbarkeit ausreichend stabiler Trackingsysteme. Die Versuchsumgebung ist abgeschlossen bei homogenen Licht-, Temperatur- und Geräuschverhältnissen. Eine Auftragsgenerierung bereitet die durchzuführenden Aufträge vor und leitet diese kabellos an ein Assistenzsystem (zum Beispiel das AR-System) und somit zum Probanden. Dieser nimmt einen leeren Warenkorb und sucht entsprechend der Vorgaben durch das Assistenzsystem die verschiedenen Positionen am Lager auf. Er entnimmt die geforderten Teile und legt sie im Warenkorb ab. Sind alle Positionen der Liste abgearbeitet, bringt er den gefüllten Warenkorb zur Versuchsbetreuung, nimmt einen neuen leeren Wagen und beginnt, den nächsten Kommissionierauftrag abzuarbeiten. Währenddessen überprüft die Versuchsbetreuung mithilfe des RFID-Lesegerätes die Teilenummern, um hieraus die Qualität der Arbeit abzuleiten. Sollte die Auftragsgenerierung melden, dass bestimmte Fächer kaum noch Teile beinhalten, befüllt die Versuchsbetreuung diese wieder. Die einzelnen Komponenten des Referenzarbeitsplatzes sind in Abbildung 4.5 dargestellt.

Der Ablauf und das Zusammenspiel der verschiedenen Systemkomponenten ist auf das ungestörte Arbeiten der Probanden ausgelegt (Abbildung 4.6). Zunächst führt der Anwender einmalig eine Kalibrierung des Systems durch [1.] (siehe dazu auch Kapitel 5). An der Auftragsgenerierung werden verschiedene versuchsrelevante Personendaten (Alter, Geschlecht, ...) erfasst [2.] und die AR-Hardware an der Auftragsgenerierung per Wireless Local Area Network (WLAN) angemeldet [3.]. Der Auftragsserver generiert eine Auftragsliste [4.], das RFID-Lesegerät wird von der Versuchsbetreuung am Auftragsserver angemeldet und übernimmt diesen Auftrag [5.]. Der Kommissionierer begibt sich danach zum Übergabepunkt, nimmt einen leeren Warenkorb [6.] und ruft den

Abbildung 4.6: Ablaufschema am Referenzarbeitsplatz



Quelle: Eigener Entwurf

aktuellen Teilauftrag vom Auftragsserver ab [7.]. Durch das Assistenzsystem wird der Werker zum Ziel geleitet [8.], wo er das gesuchte Teil entnimmt, im Warenkorb ablegt und am Assistenzsystem die Entnahme quittiert [9.]. Hierdurch wird an die Auftragsgenerierung übermittelt, dass die Entnahme des aktuellen Teils abgeschlossen ist [10.]. Nun werden die Schritte [7.] bis [10.] wiederholt, bis der komplette Auftrag (üblicherweise ca. 15 Einzelpositionen) abgearbeitet ist [11.]. Anschließend wird der befüllte Warenkorb an den Start- / Übergabepunkt gebracht und dort an die Versuchsbetreuung übergeben [12.]. Die Versuchsbetreuung scannt alle im Warenkorb befindlichen Teile mithilfe des RFID-Lesegerätes, um automatisiert zu überprüfen, ob die Teile korrekt entnommen wurden [13.]. Das Ergebnis dieser Kontrolle wird danach vom RFID-Lesegerät an die Auftragsgenerierung übermittelt, welche das Ergebnis auswertet und speichert [14.]. Während die Versuchsbetreuung den Warenkorb übernimmt und die Teile scannt, beginnt der Kommissionierer bei Schritt [4.] erneut, bis die gewünschte Versuchsdauer erreicht wurde.

Durch diesen Aufbau und Ablauf ist gewährleistet, dass Versuche mit einer Dauer von mehreren Stunden durchgeführt werden können, wobei das Gesamtsystem Arbeitsschrittdauer, Arbeitsschrittzahl und mögliche Fehler registriert.

#### 4.3.4 Unterstützungspotenzial der AR am Referenzarbeitsplatz

Die Tätigkeiten des Anwenders am Referenzarbeitsplatz können in einzelne Arbeitsschritte zerlegt werden. Die Wesentlichen im Kontext einer AR-Unterstützung sind dabei das Erkennen des Teilauftrages, die Grobnavigation zum Ziel sowie das exakte Auffinden der Zielposition (vgl. auch Abbildung 4.6):

- neuen Warenkorb nehmen
- **Teilauftrag erkennen**
- **Ziel auffinden**
  - **Navigation in die Nähe des Ziels (Grobnavigation)**
  - **Auffinden der exakten Zielposition (Feinnavigation)**
- Entnahme
- Quittierung
- Warenkorb übergeben

Für die Entnahme des korrekten Teils aus dem Regal sind folgende Informationen für den Anwender erforderlich:

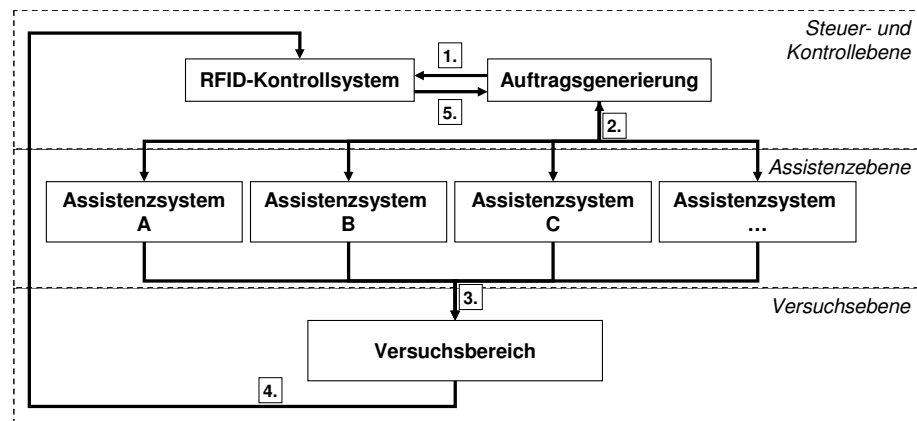
- Welches Teil soll entnommen werden?
- Wo lagert das Teil?
- Wie kann das Ziel erreicht werden?

Diese Fragen können wesentlich durch die mobile **AR** unterstützt werden, insbesondere die Hilfestellung bei der Navigation zum korrekten Ziel.

#### 4.3.5 IT-Infrastruktur

Um die verschiedenen Elemente des Referenzarbeitsplatzes miteinander zu koppeln, ist es notwendig, eine effiziente Kommunikation zwischen allen beteiligten Komponenten zu entwickeln. Hierbei ist entscheidend, dass die Verwendung mobiler **AR**-Assistenzsystemens der zuvor aufgestellten Spezifikation (Kapitel 2.2) für mobile **AR** entspricht, so dass zwingend auf drahtlose Kommunikationsmechanismen gesetzt werden muss.

Abbildung 4.7: Systemebenen



Quelle: eigener Entwurf

Für den Einsatz am Referenzarbeitsplatz wurde eine Mehrebenenanwendung entworfen. Abbildung 4.7 verdeutlicht die Kommunikationswege zwischen den einzelnen Ebenen. Zunächst wird an der Auftragsgenerierung ein Auftrag erstellt und an die **RFID**-Anwendung übermittelt [1.] (Steuer- und Kontrollebene). Die einzelnen zu kommissionierenden Teile werden nach Anforderung an ein Kommissioniersystem gesendet [2.]. Dabei ist es unerheblich, welcher Art das abfragende Teilsystem ist - es kann sowohl ein **AR**-Assistenzsystem als auch ein beliebiges anderes Assistenzsystem mit geeigneten Schnittstellen angeschlossen werden (Assistenzebene). Das Assistenzsystem übernimmt die Führung des Werkers zur entsprechenden Regalposition im Versuchsbereich [3.] (Versuchsebene). Die Versuchsebene bezeichnet dabei nicht allein den physischen Versuchsaufbau sondern gleichfalls alle IT-Methoden und -Werkzeuge, die für die Ablaufsteuerung und Versuchsauswertung am Referenzarbeitsplatz erforderlich sind. Nach Ausführung des gesamten Auftrages

im Versuchsbereich wird die Entnahme mit Hilfe des **RFID**-Kontrollsystems überprüft [4.], das Ergebnis an die Auftragsgenerierung zurück übermittelt [5.]. Für die Kommunikation wird der Industriestandard für drahtlose Netzwerkkommunikation IEEE 802.11b/g **WLAN** verwendet. Dieser Standard zeichnet sich durch eine sehr hohe Verfügbarkeit geeigneter Geräte, eine automatische Fehlerkorrektur und die Möglichkeit aus, eine Datenverschlüsselung ohne Geschwindigkeitseinbußen zu betreiben. Gegenüber des ebenfalls eruierten IEEE 802.15.1 („Bluetooth“) besitzt **WLAN** eine deutlich höhere Datenübertragungsrate<sup>10</sup> und Reichweite<sup>11</sup> sowie ausreichende Sicherheitsmechanismen<sup>12</sup>. Übertragungsverfahren wie GPRS (General Packet Radio Service) oder UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) kommen für den geplanten Einsatz auf Grund der geringen Datenübertragungsrate und hoher Latenzen nicht in Frage.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz analoger Signalübertragung. Leihweise stand eine „**AR**-Weste“ der Volkswagen AG zur Verfügung, in die ein Microvision Nomad ND2000 **HMD** integriert ist, welches per Analogfunk an einen stationären Rechner angeschlossen wird (stationäres Verarbeitungssystem, vgl. Kapitel 2.2.2). Das Mitführen eines leistungsstarken Rechners ist somit nicht notwendig, da jegliche Berechnungen auf einem in Funkreichweite stehenden Server durchgeführt werden. Jedoch hat sich gezeigt, dass der verwendete Analogfunk verhältnismäßig anfällig gegenüber Störfeldern und umgebende Metallgegenständen ist. Die übertragenen Bilder enthalten teilweise starkes Bildrauschen, Verzerrungen und Artefakte. Somit scheidet diese Möglichkeit der drahtlosen Kommunikation für das hier beschriebene Vorhaben aus und es wurde **WLAN** als Kommunikationsstandard für die weiterführenden Tätigkeiten ausgewählt.

Für die Kommunikation der Anwendungen wird das Transmission Control Protocol (**TCP**) verwendet. Es bietet Vorteile dadurch, dass auch über Geräte- und Betriebssystemgrenzen hinweg eine Kommunikation ermöglicht wird und der Empfang der korrekten Daten beim Empfänger sichergestellt werden kann. Andere Protokolle wie IPv6 oder IPX/SPX scheiden durch den höheren Entwicklungsaufwand und geringeren Verbreitungsgrad aus. Einzig der Einsatz des User Datagram Protocols (**UDPs**) wurde näher in Betracht gezogen, da **UDP** Geschwindigkeitsvorteile bei der Datenübertragung gegenüber **TCP** bietet [HLDHR03]. Da jedoch bei **UDP** nicht ohne zusätzliche Mechanismen sichergestellt werden kann, dass die versendeten Datenpakete auch wirklich beim Empfänger ankommen, wird **TCP** im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit für die Kommunikation der Systemkomponenten verwendet.

Für die Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten (Abbildung 4.7) wurde ein Anwendungsprotokoll erstellt. Es existieren verschiedene Nachrichten, die von den Teilnehmern der Verbindung interpretiert werden müssen:

- *NextID* - Die Gegenstelle fordert das Senden der nächsten Nachricht.
- *PrevID* - Die Gegenstelle fordert das Senden der vorherigen Nachricht erneut an. (dies kann passieren, wenn ein Anwender am Assistenzsystem anfordert, den letzten Arbeitsschritt zu wiederholen)

<sup>10</sup> 802.11g bis zu 54 Mbit/s, Bluetooth Generation 2 bis zu 2,1 Mbit/s

<sup>11</sup> Bluetooth Klasse II bis zu 50m im Freien, 802.11g bis zu 300m im Freien

<sup>12</sup> WPA-II Verschlüsselung

- *nJobOK* - Jobübermittlung abgeschlossen, der neue Job kann nun beginnen
- *Msg* - Nachfolgend wird eine Nachricht übermittelt. Das bedeutet, das danach folgende Datenpaket soll unbehandelt weitergeleitet werden um es danach auf einem Display in Textform anzuzeigen.
- *abort* - Der aktuelle Job wird abgebrochen.

Dadurch können die eingesetzten Assistenzsysteme der Assistenzebene die notwendigen Auftragsdaten von der Steuer- und Kontrollebene abrufen.

#### 4.3.6 Qualitative Analyse am Referenzarbeitsplatz

Zur qualitativen Auswertung der Arbeitsleistung sind geeignete Maße erforderlich. Einen guten Überblick über qualitätsrelevante Daten in der Kommissionierung und deren Ermittlung bietet Goldscheid [Go107]. Solche qualitätsrelevanten Daten sind:

- *Fehlerquoten* und Fehlerarten
- Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten für alle Teilprozesse
- *Kommissionier-Zeitdaten*
- Kostensätze für die einzelnen Teilprozesse
- Nacharbeits- und Retourenabwicklungskosten

Insbesondere die *Fehlerquoten* sowie die *Zeitdaten* können durch die mobile AR verbessert werden. Dies ist durch die Verringerung von Suchzeiten, der Parallelisierung der Auftragsdurchführung und Nebentätigkeiten sowie der aus Nutzerperspektive lagerichtig visualisierten, exakten Entnahmeposition möglich [Alt02].

Während die *Zeitdaten* die Entnahmedauer einzelner Auftragspositionen sowie des gesamten Auftrages betreffen, lassen sich mögliche Fehlerarten nach Goldscheid unterteilen in:

- Typfehler (das falsche Teil)
- Mengenfehler (die falsche Anzahl einer einzelnen Teileposition)
- Auslassungsfehler (ganze Teileposition vergessen)
- Zustandsfehler (Teile beschädigt, falscher Füllstand, etc.)

Am Referenzarbeitsplatz entfällt die Fehlerart „Mengenfehler“, da der Versuchsablauf darauf ausgelegt ist, dass jeweils nur ein einzelnes Teil je Auftragsposition zu entnehmen ist. Weiterhin entfällt die Kategorie „Zustandsfehler“, da sich alle im Lager befindlichen Teile in gleichartigem Zustand befinden.

Somit werden für die qualitative Analyse am Referenzarbeitsplatz Typfehler und Auslassungsfehler sowie die Entnahmedauer einzelner Auftragspositionen und die Dauer des gesamten Auftrages ausgewertet.



### 4.3.7 Erfassung nutzerbezogener Parameter

Neben der Erfassung qualitativer Daten zur Arbeitsleistung müssen insbesondere psychophysiologische Parameter während einer Versuchsdurchführung gemessen werden. Nach dem Fahrenberg'schen Mehrebenenkonzept der Psychophysiologie gilt es hierbei, gleichzeitig drei Ebenen zu erfassen und zueinander in Bezug zu setzen [Fah69]:

1. Leistung
2. subjektive Beanspruchung (Anstrengungsempfinden)
3. objektive Beanspruchung

Für die Erfassung und Interpretation der objektiven und subjektiven Beanspruchung bei der Arbeit am Referenzarbeitsplatz werden geeignete Beanspruchungsmaße benötigt. Daher muss am Referenzarbeitsplatz untersucht werden, ob sich bestimmte ausgewählte Messverfahren für die Untersuchung von Auswirkungen der mobilen AR-Technologie auf den Menschen eignen.

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Arbeitsmedizin der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg durchgeführt und von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät durch ein positives Votum genehmigt (Aktenzeichen 35/08).

#### Subjektive Beanspruchungsmaße

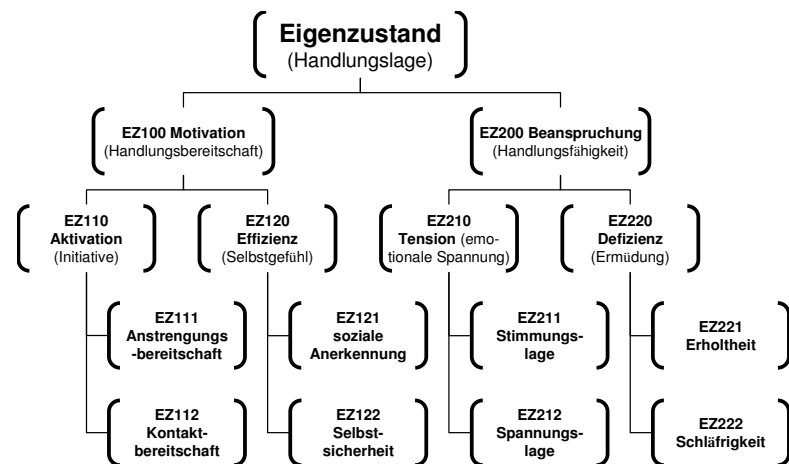
Zur Erfassung der subjektiven Beanspruchung sind jeweils vor und nach den Tests drei Fragebögen von den Probanden auszufüllen.

Bei der Befindlichkeitsskala (BFS) nach Zerssen [vZK76] handelt es sich um ein standardisiertes Testverfahren zur Eruiierung des momentanen Befindens des Probanden. Eine Objektivierung von Befindlichkeitsänderungen wird durch mehrmaligen Einsatz der BFS möglich. Der Fragenkatalog, der 28 Eigenschaftspaare enthält, wird im Rahmen psychologischer Untersuchungen eingesetzt. Der Proband wählt bei jedem Eigenschaftspaar dasjenige Adjektiv aus, das seinem aktuellen Zustand am ehesten entspricht. Nur wenn keine der beiden Eigenschaften zutrifft, wird die Option „weder noch“ gewählt. Bei der Auswertung, die computergestützt mithilfe des Wiener Testsystems (Fa. Schuhfried GmbH, Österreich) erfolgt, werden die Fragebogen-Rohwerte standardisiert in Stanine-Werte [Bal08] von 1 bis 9 überführt. Dabei spricht das Absinken des Stanine-Wertes im Vorher-Nachher-Vergleich für eine Besserung und der Anstieg für eine Verschlechterung des Befindens. Die durchschnittliche Bearbeitungsdauer der BFS beträgt etwa 3 Minuten.

Die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) von Nitsch ist ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Skalierung des aktuellen Befindens einer Person [Nit76]. Die EZ-Skala ermöglicht die Bewertung der situationsgebundenen Beanspruchungs-, Motivations- und Stimmungslage einer Person als Ausdruck ihres augenblicklichen Gesamtbefindens - von Nitsch als „Eigenzustand“ bezeichnet. Die EZ-Skala enthält 40 Adjektive, die bezüglich ihres Zutreffens auf den momentanen Zustand des Probanden auf einer Ordinalskala von 1 („trifft kaum zu“) bis 6 („trifft völlig zu“) zu bewerten sind. Die EZ-Skala ist praktisch eine hierarchische Faktorenanalyse (eine Hierarchie von insgesamt 14 Binärfaktoren), die den Eigenzustand analysiert, verstanden als



Abbildung 4.8: Faktorenhierarchie der EZ-Skala



Quelle: Eigener Entwurf nach [Nit76]

erlebnismäßig repräsentierte aktuelle Handlungslage einer Person. Man unterscheidet zwei Faktorengruppen: Motivation und Beanspruchung. Die Interpretation der erhaltenen Stanine-Werte erfolgt auf der Grundlage einer dreistufigen Faktorenhierarchie, die in Abbildung 4.8 schematisch dargestellt ist. Dabei werden die Aussagen von der ersten, allgemeinen zur dritten, speziellen Ebene immer detaillierter. Hohe Stanine-Werte für die einzelnen Faktoren bedeuten, dass die Probanden ihr gegenwärtiges Gesamtbefinden - und damit ihre Handlungslage - positiv einschätzen. Es muss allerdings beachtet werden, dass es sich bei den Faktoren EZ200 (Handlungsfähigkeit), EZ220 (Ermüdung), EZ221 (Erholtheit), EZ222 (Schläfrigkeit) und EZ212 (Spannungslage) um sogenannte „umgepolte“ Faktoren handelt. Für die Interpretation bedeutet dieser Sachverhalt, dass durch hohe Werte das genaue Gegenteil beschrieben wird; so signalisiert beispielsweise ein Stanine-Wert von 8 beim Binärfaktor EZ212 ein hohes Maß an Entspannung. Dieses standardisierte Testverfahren benötigt eine Bearbeitungszeit von ca. 10 Minuten.

Als letzter Fragebogen wird der Beschwerdefragebogen des Instituts für Arbeitsmedizin genutzt. Mittels dieses Verfahrens sollen das Vorhandensein und die Intensität körperlicher Beschwerden wie Kopfschmerzen, Muskelverspannung und verschiedene Augensymptome erfasst werden. Um beurteilen zu können, ob die Beschwerden durch die Belastung während des Versuches verursacht wurden oder ob es sich um bereits existierende Phänomene handelt, wird auch dieser Fragenkatalog den Probanden vor und nach dem Versuch vorgelegt; die Bearbeitungsdauer beträgt etwa 3 Minuten.

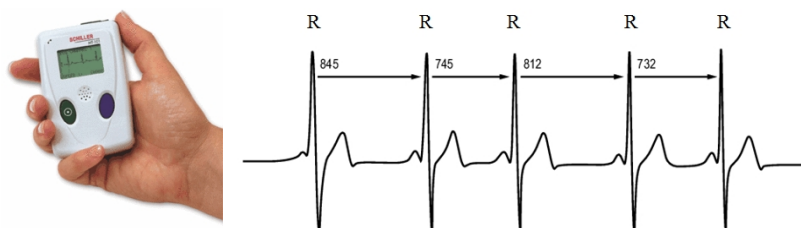
Die genutzten Fragebögen sind in Anhang A.3 der vorliegenden Arbeit beigefügt.

Weitere Möglichkeiten für das subjektive Einschätzen der Beanspruchung bestehen im Einsatz der Subjective Workload Assessment Technique (SWAT [PB89]), des Subjective Mental Effort Questionnaire (SMEQ [Zij93]) oder des NASA Task Load Index (NASA-TLX [Har06]), wobei von diesen Verfahren der NASA-TLX die höchste Validität und Reliabilität aufweist und stark mit dem Aufgabenerfolg der Probanden korreliert [Moi03]. Ein Nachteil dieser Tests ist es, dass die Versuchspersonen anscheinend dazu tendieren, sich den Tests anzupassen und somit eine vorher durch die Versuchsbetreuung geäußerte Erwartungshaltung die Versuchsergebnisse beeinflusst [ENB90]. Die EZ-Skala hat hier den Vorteil, dass durch die „umgepolten“ Faktoren eine solche Beeinflussung weniger möglich ist.

## Objektives Beanspruchungsmaß: Analyse der Herzratenvariabilität

Durch die bisher beschriebenen Analyseverfahren (Fragebögen) ist es nicht möglich, den aktuellen Beanspruchungszustand während der Arbeit zu ermitteln, da zum Ausfüllen der Fragebögen stets die Arbeit unterbrochen werden muss. Zur Erfassung des Befindens der Probanden während der Arbeit wurde daher die Analyse der Herzratenvariabilität (HRV) ausgewählt. Hierzu wird den Probanden der digitale Langzeit-Elektrokardiogramm (EKG)-Rekorder „MT-101“ der Fa. Schiller angelegt (Abbildung 4.9a), der in einem Bauchgurt mitgeführt wird. Aus den so gewonnenen EKG-Rohdaten kann nach dem Beenden des Versuchsdurchlaufs die HRV ermittelt und analysiert werden, so dass auch objektive Aussagen über den objektiven Beanspruchungszustand eines Probanden während des Tests getroffen werden können.

Abbildung 4.9: EKG-Rekorder und EKG-Kurve



(a) Digitaler Langzeit-EKG-Rekorder „MT-101“ der Fa. Schiller (b) Darstellung der physiologisch vorhandenen spontanen Schwankungen der Herzperiodendauern im EKG

Quelle: Fa. Schiller, eigener Entwurf

Eine Möglichkeit zur Erfassung der Beanspruchung und der sogenannten „allgemeinen Aktivierung“ des Organismus besteht in der Analyse der HRV [Pfi08]. Die Herzschlagfolge ist - im Gegensatz zur allgemeinen Annahme - einer mehr oder weniger ausgeprägten Variabilität unterworfen, die sich in spontanen Schwankungen der Herzperiodendauern äußert (Abbildung 4.9b) und deren Erfassung auch als Herzrhythmusanalyse bezeichnet wird. Herzaktionen können mittels Ableitung eines thorakalen<sup>13</sup> EKGs als bioelektrische Phänomene dargestellt werden. Das markanteste Signal im EKG ist die sogenannte R-Zacke, wobei der Abstand zweier R-Zacken als Herzperiodendauer definiert ist. Die fortlaufende Aufzeichnung dieser Werte bildet das RR-Intervall-Tachogramm, das als Grundlage für weitere Analysen, auch die der HRV, dient [Hor03].

Die HRV-Analyse kann für Beanspruchungsanalysen an Arbeitsplätzen im Rahmen von arbeits- bzw. psychophysiologischen Untersuchungen genutzt werden, so auch für den Einsatz der Augmented Reality [OSL02]. Für die HRV-Analyse existiert die deutsche Leitlinie „Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin“ [FPUW06], welche unter anderem detailliert Erfassungsverfahren, Registrierungs- und Auswertungsmethodik sowie Einflussfaktoren beschreibt. Zur Beanspruchungsanalyse an Arbeitsplätzen bietet sich die HRV an, da sie die vegetative / autonome Balance des Organismus widerspiegelt (Ausdruck der allgemeinen Aktivierung). Das qualifiziert sie für psychophysiologische Untersuchungen, da hier die physiologische Antwortreaktion des Körpers auf Arbeitsbelastungen weniger stoffwechselbasiert ist als bei reiner Muskelarbeit. Parameter, die sich für überwiegend muskulär betonte Arbeit bewährt haben (z.B. Herzschlagfrequenz, EMG-Aktivität, Sauerstoffverbrauch), versagen bei psychomentaler Arbeit [vSM<sup>+</sup>00, PBS<sup>+</sup>07]. Beim Einsatz der

<sup>13</sup> die Brustwand (Thorax) betreffend

HRV-Analyse ist aber zu beachten, dass HRV-Maße sehr stark inter- und intraindividuell streuen und durch verschiedene Confounder beeinflusst werden können (z.B. Lebensalter, Geschlecht, Trainingszustand, gesundheitliche Verfassung, genetische Veranlagung). Daher ist eine ausreichende Probandenzahl für eine Fragestellung an einem Arbeitsplatz oder bei einer Tätigkeit nötig und die Confounder müssen ausreichend beachtet werden, um sensible und valide Aussagen treffen zu können (vgl. [NESN02]). Bei einer sorgfältigen Untersuchungsplanung sind mit der HRV-Analyse auch für Untersuchungen an konkreten Arbeitsplätzen ausreichende Gütekriterien (Spezifität und Reliabilität) erreichbar.

Bei der HRV-Analyse im Zeitbereich, die eine der einfachsten Methoden darstellt, werden die Intervalle aufeinanderfolgender normaler Herzaktionen über die Zeit gemessen. Voraussetzung dafür ist eine kontinuierliche, lückenlose EKG-Aufzeichnung [Tas96, PRS06]. Es wurden folgende zeitbezogene Parameter ermittelt:

- Delta Hf (Änderung der Herzschlagfrequenz)
- SDNN (Standardabweichung aller RR-Intervalle in [ms]).

Für die HRV-Analyse im Frequenzbereich wird das RR-Kardiotachogramm mittels schneller Fouriertransformation einer Spektralanalyse unterzogen, um frequenzbezogene Daten zu erhalten. Das Ergebnis ist ein Konglomerat von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen (Tabelle 4.3), welches in seiner Gesamtheit als Powerspektrum bezeichnet wird und den Bereich von 0,0001 bis 1,0 Hz umfasst. Die Leistung jedes Frequenzanteils wird dann in einem Leistungsdichtespektrum abgebildet und für die Auswertung der Flächeninhalt (Maßeinheit  $ms^2$ ) der einzelnen Frequenzbänder und der Gesamtspektraldichte bestimmt [Tas96, PRS06].

Tabelle 4.3: Überblick über die HRV-Parameter im Frequenzbereich

HRV-Parameter	Dimension	Erklärung
<i>LSP</i>	$ms^2$	Gesamtleistungsspektrum
<i>ULF</i>	$ms^2$	Leistung im ultra-low-frequency-Band (0,0001-0,003 Hz)
<i>VLF</i>	$ms^2$	Leistung im very-low-frequency-Band (0,003-0,004 Hz)
<i>LF</i>	$ms^2$	Leistung im low-frequency-Band (0,04-0,15 Hz)
<i>HF</i>	$ms^2$	Leistung im high-frequency-Band (0,15-0,4 Hz)
<i>UHF</i>	$ms^2$	Leistung im ultra-high-frequency-Band (0,4-1,0 Hz)
<i>LF/HF</i>	1	Verhältnis von LF- zu HF-Leistung

Bei der Auswertung interessieren besonders das Gesamtleistungsspektrum (LSP) und die relativen Anteile der Leistungen im LF- und HF-Band am Gesamtleistungsspektrum. Außerdem wurde das Verhältnis der niederfrequenten zur hochfrequenten Leistung (LF/HF-Quotient) als Charakteristikum der sympathovagalen Balance erfasst. Während das LF-Band im Leistungsdichtespektrum aus der Wirkung von Sympathikus und Parasympathikus gebildet wird, handelt es sich beim HF-Band fast ausschließlich um eine Wirkung des Parasympathikus auf das Herz. Ein hoher Quotient aus LF/HF spricht daher für eine große Herz-Kreislauf-Beanspruchung [Tas96].

## Weitere Parameter

Neben den zuvor genannten Parametern werden mit einem selbst erstellten Fragebogen (Anhang A.3) statistische Daten und Confounder erfasst, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Klassische Confounder, die bei psychophysiologischen und ophthalmologischen Untersuchungen berücksichtigt werden sollten, sind Lebensalter, Geschlecht, ehemalige und aktuelle neurotoxische Exposition, Alkoholkonsum, Drogen (therapeutische und andere) sowie konstitutionelle Faktoren (angeborene und erworbene). Bei psychometrischen Untersuchungen mittels PC-gestützten Diagnostiksystemen wird zudem die Muttersprache und Computer-Erfahrung als Confounder berücksichtigt. Für die Untersuchungen zum Langzeiteinsatz von AR-Systemen wird demnach auch die bisherige Erfahrung mit AR- und VR-Technologien abgefragt.

### 4.3.8 Fazit und Ausblick

Es wurde ein Referenzarbeitsplatz erstellt, an dem unter realistischen und zugleich reproduzierbar veränderlichen Arbeitsbedingungen neben ingenieurwissenschaftlichen auch psychologische und arbeitsmedizinische Fragestellungen untersucht werden sollen. Als Anwendungsszenario wurde die Kommissionierung ausgewählt, da sie Vorteile gegenüber anderen Szenarien hinsichtlich des Ablaufs und der Auswertung bietet: Es können beliebige Testpersonen ausgewählt werden, der Ausgangszustand ist sehr einfach wieder herstellbar und die Bearbeitungsdauer und Bearbeitungsqualität sind sehr gut quantifizierbar. Es wurde ein Versuchsablauf konzipiert, bei dem neben der Erfassung qualitativer Daten verschiedene Testverfahren zur Erfassung nutzerbezogener Parameter integriert wurden. Die für den Versuchsablauf genutzte IT-Infrastruktur erlaubt das Anbinden AR-basierter und nicht-AR-basierter Werkerassistenzsysteme, sodass unterschiedliche Verfahren und Methoden am Referenzarbeitsplatz getestet werden können.

Nach der Durchführung einer ersten großen Versuchsreihe bei der die Eignung als „Referenzarbeitsplatz“ nachgewiesen wurde, sollte gemäß des Belastungsbeanspruchungs-Konzeptes der Arbeitsmedizin [Sch06a] zusätzlich zu den am Referenzarbeitsplatz stattfindenden Untersuchungen eine arbeitsmedizinische Statusuntersuchung der einbezogenen Probanden durchgeführt werden. Diese Untersuchungen können für jeden Probanden einmalig am Institut für Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg erfolgen. Ziel dieser Statusuntersuchungen ist es, Ein- und Ausschlusskriterien zu erkennen sowie nach der Versuchsdurchführung am Referenzarbeitsplatz die Ergebnisse korrekt interpretieren zu können. Da während der geplanten Versuche besonders das visuelle System des Menschen beansprucht wird, müssen im Rahmen der Statusuntersuchung überwiegend ophthalmologische Untersuchungen durchgeführt werden:

- Sehschärfe (Visus) für die Ferne und arbeitsplatzbezogene Nähe, ggf. mit einer am Arbeitsplatz getragenen Sehhilfe
- Räumliches Sehen (Stereopsis)
- Stellung der Augen, bzw. Sehachsen (Phorie)
- Fragebogen zu Augenbeschwerden
- Farbensinn (Ishihara, Velhagen, Tritan, D-15d, Anomaloskop IF 2)

- Gesichtsfeld (Perimetrie M 700)
- Kontrastempfindlichkeit
- Dynamisches Sehen

Abbildung 4.10: Das Testsystem „TAP“ von Zimmermann und Fimm



Quelle: Eigene Aufnahme

Als weiteres Beanspruchungsmaß zur objektiven Erfassung des Befindens der Probanden wurde der „Test zur Geteilten Aufmerksamkeit“ (System „TAP“ von Zimmermann und Fimm) in den Referenzarbeitsplatz integriert. Dabei müssen die Probanden gleichzeitig visuelle und akustische Reize beachten. Dieser Test sollte in zukünftigen Untersuchungen ebenfalls eingesetzt werden, um Aussagen über die Aufmerksamkeit, Konzentration und Müdigkeit gewinnen zu können (Abbildung 4.10). Dieser Test stellt eine Ergänzung zu dem bisherigen objektiven Analyseverfahren (HRV-Analyse) dar und ist jeweils vor und nach der Arbeitsphase durchzuführen. Die Durchführung des Tests dauert ca. 6 Minuten.

Eine weitere zukünftig geplante Untersuchungsmethodik stellt der Einsatz von Systemen zur Blickbewegungsanalyse im Referenzarbeitsplatz dar. Dadurch wird es möglich, wahrnehmungspsychologische Aspekte während des Langzeiteinsatzes mobiler AR-Technologie zu untersuchen (siehe 6.3 und [HUD<sup>+</sup>08]).

Die Untersuchungen zum arbeitsmedizinischen Status sowie der Einsatz von TAP und der Blickbewegungsanalyse sollten jedoch erst erfolgen, nachdem durch eine erste umfangreichere Untersuchung mit ca. 20 Probanden am Referenzarbeitsplatz klargestellt wurde, dass das Konzept des Versuches für die Erfassung der Beanspruchungs- und Leistungsparameter geeignet ist.

## 4.4 Erstellung eines mobilen AR-Systems

### 4.4.1 Motivation

Zu Beginn dieses Kapitels wurde erläutert, dass zunächst ein mobiles AR-System als Ausgangsbasis erstellt werden musste, an dem erste Untersuchungen zum Langzeiteinsatz im Referenzarbeitsplatz durchgeführt werden können. In den nachfolgenden Unterkapiteln liegen daher Schwerpunkte auf der

- Auswahl eines geeigneten Displays,
- Analyse der darzustellenden Informationen,
- Auswahl eines geeigneten Navigationsverfahrens und
- Erstellung eines mobilen AR-Gesamtsystems für den Einsatz im Referenzarbeitsplatz

#### 4.4.2 Auswahl eines Head Mounted Displays

In Kapitel 2.2.3 wurden unterschiedliche Visualisierungstechniken mobiler AR-Systeme vorgestellt. Dabei wurde deutlich, dass die OST-HMDs für industrielle Einsatzzwecke günstige Ausgabemedien für die mobile AR sind. Für die geplanten Untersuchungen zur Beanspruchung beim Langzeiteinsatz mobiler AR-Technologien wurde daher der Fokus auf OST-HMDs gelegt, obwohl der vorgestellte Referenzarbeitsplatz auch Untersuchungen an Handheld-AR, LookAround- oder VST-Displays und anderen Werkerassistenzsystemen ermöglicht.

Für die Auswahl eines für die geplanten Untersuchungen geeigneten HMDs wurden Anforderungen recherchiert (Kapitel 3.3.1), die an die Geräte gestellt werden, um ein HMD auszuwählen.

Insgesamt sind viele Anforderungen an den Einsatz von HMDs in der Industrie bekannt, jedoch insbesondere die nutzerbezogenen Eigenschaften wie „psychische und physische Belastung“ nicht quantifiziert. Dadurch ist es bisher nicht möglich, ein HMD anhand dieser Anforderungen auszuwählen. Des Weiteren existieren am Markt aktuell nur sehr wenige kommerzielle Geräte, sodass heute noch keines zur Verfügung steht, welches „ideal“ für die geplanten Untersuchungen ist.

Daher wurde als Kompromiss das bisher bestmögliche Gerät für das AR-System ausgewählt: Das Microvision Nomad ND2100 übertrifft die Konkurrenz durch die sehr gute Sicht auf die Umwelt (nahezu 100%) bei sehr guter Leuchtstärke (bis 2741,12 cd/m<sup>2</sup>) und vergleichsweise geringem Gewicht (128 g). Es hat jedoch die Nachteile, nur monochrom rot (5-bit) bei einem mittelmäßigen Field of View (23° x 17.25°) darstellen zu können. Dadurch gewinnt die Frage an Bedeutung, welche und wie viele Informationen dem Anwender in einem solchen HMD am Referenzarbeitsplatz eingeblendet werden müssen.

#### 4.4.3 Informationsdarstellung

Nachfolgend wird untersucht, welche Informationen am Referenzarbeitsplatz benötigt werden und wie diese im HMD dargestellt werden können.

##### Randbedingungen für die Informationsdarstellung

Die wesentlichen benötigten Informationen am Referenzarbeitsplatz dienen dem Erkennen des aktuellen Teilauftrages sowie dem Auffinden der Zielpositionen mittels Grob- und Feinnavigation (vgl. Kapitel 4.3.4).

Die Darstellung dieser Informationen am Referenzarbeitsplatz kann rein textuell in Form einer Teilenummer geschehen. Andererseits kann ein Pfeil direkt auf die Entnahmestelle zeigen oder ein Foto des zu entnehmenden Teils eingeblendet werden. In jedem Fall muss die im HMD dargebotene Repräsentation einer Information vom Nutzer interpretiert werden. Da dies stets subjektiv



tiv geprägt ist, kann das erwartete Ergebnis (Nutzer versteht Hinweis so, wie vorgesehen) nicht vollständig sichergestellt werden [TSLB05]. Daher müssen die Informationen so dargestellt sein, dass eine Fehlinterpretation möglichst ausgeschlossen werden kann. Dabei sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Die primäre Aufgabe des Nutzers besteht **nicht** in der Interaktion mit dem AR-System oder der Informationsgewinnung aus der AR-Einblendung, sondern in der Handhabung realer Objekte.
- Die Information muss die auszuführende Arbeitsaufgabe für den Nutzer intuitiv beschreiben, ansonsten wird die Information eher stören als helfen [FAD02].
- Die Darstellung im AR-Display darf nicht zu viel von der umgebenden realen Welt verdecken [TSM<sup>+</sup>08].
- Der Nutzer darf nicht durch zu viele eingeblendete Elemente überlastet werden.
- Die Farbe der eingeblendeten Informationen sollte eine schnelle Informationsaufnahme und / oder Aufmerksamkeitssteuerung bewirken und dabei den Benutzer nicht belasten [TSM<sup>+</sup>08].
- Eingeblendete Objekte müssen sich physikalisch korrekt verhalten, Inkorrekte Bewegungen der AR-Darstellungen im Display müssen vermieden werden [FAD02].
- Je nach Anwendungsfall müssen für die darzustellende Information gegebenenfalls unterschiedliche, entfernungsabhängige Darstellungsformen gewählt werden [FAD02].
- Geeignete Bedingungen, unter denen Informationen angezeigt werden, müssen definiert werden [FAD02].
- Zur Evaluierung der Effektivität der Darstellungen müssen anwendungsfallbezogene Tests durchgeführt werden [FAD02].

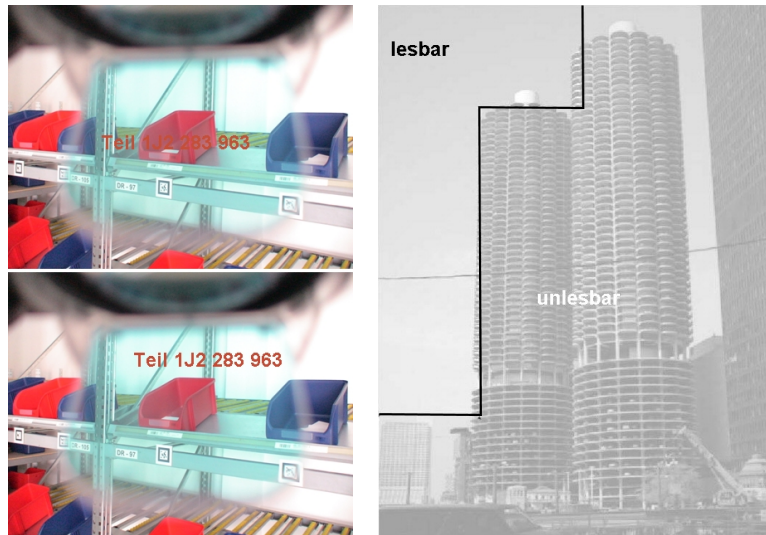
Nutzerbezogene Untersuchungen, welche diese Bedingungen untersuchen oder berücksichtigen, existieren bisher kaum (vgl. Kapitel 3.4).

Es ist bekannt, dass auf einem herkömmlichen Monitor abstrakte Icons bei forcierter visueller Suche schneller gefunden werden als Texteinblendungen [AMW87]. Durch eine ortsfeste Anbindung (d.h. Einblendung desselben Informationstyps stets an derselben Stelle) ist dieser Unterschied jedoch partiell kompensierbar [GB90]. Da einige Informationen bildlich wesentlich effizienter aufgenommen werden [CCM98], kann im Falle der AR von einem Vorteil für Icons und ähnliche Repräsentationsformen gegenüber Text ausgegangen werden.

Ortsfeste Einblendungen können dem schnellen Erfassen von Informationen dienlich sein. Jedoch können dadurch Probleme entstehen, wenn beispielsweise dunkelrote Einblendungen vor einem dunkelroten Hintergrund (Abbildung 4.11a) oder kleine detailreiche (kontrastarme [LT04]) Einblendungen vor einem stark texturierten Hintergrund eingeblendet werden (Abbildung 4.11b). In diesem Fall kann eine automatische Anpassung des Einblendungsortes vorgenommen oder automatisiert ein Bereich des Hintergrundes lichtundurchlässig geschaltet werden (vgl. [LT04] und Kapitel 3.3.1).



Abbildung 4.11: Problematische Darstellung von Informationen im HMD



(a) Störung der Informationsaufnahme bei falscher Farbwahl

(b) Markierung der effektiv nutzbaren Teilbereiche eines Bildausschnitts

Quelle: Eigener Entwurf und [LT04]

Für die Umsetzung mithilfe des Microvision Nomad ND2100 HMDs bedeutet das:

- Kenntlichmachung der Entnahmeposition mittels geeigneter Visualisierungsmetapher
- Verwenden eines transparenten Körpers für die Visualisierungsmetapher („durchsichtiges Objekt“)
- Nutzung weniger Darstellungselemente
- Darstellungsfarbe beim verwendeten HMD beschränkt auf „Rot“
- Anpassung der Visualisierungsmetapher an Bewegungen und Blickrichtung des Nutzers
- Nutzung eines geeigneten Trackingverfahrens
- Trennung in Grob- und Feinnavigation, wobei die Grobnavigation die Einblendung einer „Regalnummer“ an einer ortsfesten Position im Display bedeutet
- Permanente Anzeige der Grobnavigation, situationsabhängige Einblendung der Feinnavigation
- Praktikable Lösung für Grobnavigation am Referenzarbeitsplatz bisher unbekannt, daher Nutzertest zur Navigation erforderlich
- Verwendung von Icons am Referenzarbeitsplatz ungeeignet, da Teile und Regale jeweils gleichartig aussehen

Eine automatisierte Anpassung der dargestellten Informationen an den Hintergrund ist nicht notwendig, da alle Einblendungen im HMD am Referenzarbeitsplatz in jeder Situation klar erkennbar sind<sup>14</sup>. Alt schlägt als eine mögliche Visualisierungsmetapher für die Feinnavigation einen Rahmen vor, der um die entsprechende Entnahmeposition herum angezeigt wird [Alt02].

<sup>14</sup> Obwohl das HMD nur in roter Farbe darstellen kann, stellt das Verwenden der in Abbildung 4.11a gezeigten matt-roten Boxen kein Problem dar, da die leuchtend-rote Darstellung des HMDs auch auf den Boxen gut erkennbar ist.

## Nutzertest zur Navigation

Das wesentliche Unterstützungspotenzial der AR besteht im Referenzarbeitsplatz darin, den Teilauftrag zu erkennen, zum korrekten Regal navigiert zu werden und das korrekte Regalfach zu identifizieren (vgl. Kapitel 4.3.4).

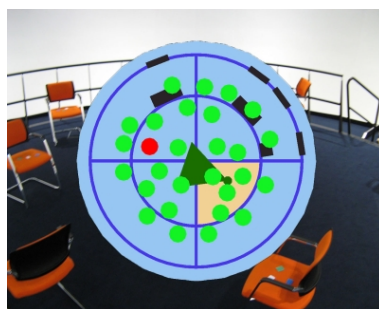
Für die Umsetzung eines Navigationskonzeptes am Referenzarbeitsplatz konnte nach der in Kapitel 3.3.3 dargestellten Recherche nicht entschieden werden, ob eine implizite oder explizite Navigation effektiv und sinnvoll für die weiteren Untersuchungen ist (siehe auch [GAH07]). Daher wird in einem nachfolgend beschriebenen Nutzertest ein implizites mit einem expliziten Verfahren verglichen, um eine Auswahl für die Umsetzung am Referenzarbeitsplatz treffen zu können. Hierfür werden drei Verfahren miteinander verglichen:

- implizite Papierkarte (ähnlich einem Lageplan)
- AR-gestützte implizite 2D-YAH-Karte
- AR-gestützte explizite kompassähnliche Pfeilnavigation

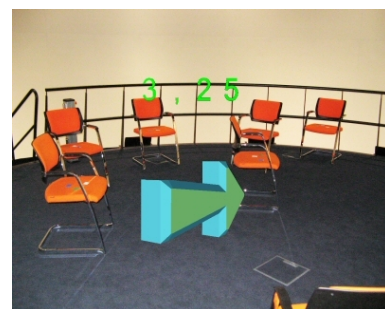
Für die Realisierung eines AR-gestützten Navigationskonzeptes ist es erforderlich, die Nutzerposition in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (Translation und Rotation) erfassen zu können. Am Fraunhofer IFF existiert ein Trackingsystem, welches mithilfe von 12 Infrarot-Kameras (Fa. Vicon) und entsprechenden Infrarot-Marken ein solches hochwertiges Tracking auf einer kreisförmigen Fläche von etwa 12 m Durchmesser ermöglicht [SMM<sup>+</sup>08]. Diese Fläche entspricht etwa der Fläche, die der Referenzarbeitsplatz einnimmt, daher wurde der nachfolgend beschriebene Versuch zur Navigation in diesem Trackingvolumen (d.h. nicht am Referenzarbeitsplatz selbst) durchgeführt.

Für den Referenzarbeitsplatz ist der Einsatz eines HMDs vorgesehen. Dennoch wird für den hier beschriebenen Versuch zur Navigation kein HMD-basiertes, sondern ein Handheld-AR-System bestehend aus Laptop und Kamera genutzt. Dies bietet für den durchzuführenden Versuch den Vorteil, die gegenüber heutigen UMPCs vergleichsweise hohe Rechenleistung des Laptops zur gleichzeitigen Verwendung des Kamerabildes und der Vicon-Trackingdaten nutzen zu können.

Abbildung 4.12: AR-unterstützte Navigation im Versuchsbereich



(a) Navigation mittels 2D-YAH-Karte - die rote Wegmarke ist aufzusuchen, dunkelgrün ist das Sichtfeld des Nutzers dargestellt



(b) Navigation mittels Pfeil, der Pfeil zeigt in Richtung der aufzusuchenden Wegmarke, die Distanz ist grün in Meter angegeben

Quelle: Eigene Aufnahmen

Die Versuchsfläche ist mit 28 Landmarken versehen, die eingemessen und nach folgenden Kriterien im Versuchsbereich aufgestellt sind:

- zufällige Verteilung der Landmarken (ähnlich zur Verteilung der Elemente des Referenzarbeitsplatzes)
- ausreichend Platz zum freien Bewegen
- Durchgänge müssen frei bleiben
- jede Landmarke muss innerhalb des Trackingbereiches liegen

Von den insgesamt 28 Landmarken werden je Verfahren 18 Landmarken genutzt. Hierfür wurden vorab verschiedene Routen festgelegt, die sich je Verfahren voneinander unterscheiden. Um auszuschließen, dass Ergebnisse durch Lerneffekte verfälscht werden, sind je Navigationsart unterschiedliche Aufgaben zu erfüllen:

- Während der Papierkartennavigation bekommt der Proband eine Startkoordinate genannt (z.B. „X-28“), die er auf der Karte wiederfinden und im Versuchsbereich aufsuchen muss. Wenn er die entsprechende Koordinate erreicht, findet er auf der Landmarke eine Notiz, die die nächste Koordinate beinhaltet, welche per Papierkartennavigation erreicht werden soll. Zur Kontrolle wird die Koordinate vom Probanden laut verlesen, die Versuchsbetreuung nennt bei Misserfolg die nächste korrekte Koordinate.
- Während der 2D-YAH-Navigation (Abbildung 4.12a) wird auf einem portablen PC eine Karteneinblendung dargestellt, auf der die aktuelle eigene Position sowie die Zielposition markiert sind. Zur Kontrolle liegen an den Zielpositionen Papierzettel aus, die laut verlesen und gegebenenfalls von der Versuchsbetreuung korrigiert werden. Zur Vermeidung von Lerneffekten tragen sie diesmal Namen europäischer Hauptstädte (z.B. „Berlin“).
- Bei der expliziten Pfeilnavigation (Abbildung 4.12b) deutet ein Pfeil lagerichtig zur nächsten Landmarke. Zusätzlich wird die Entfernung zum Ziel angegeben. Der Proband folgt der Pfeilanzeige, liest erneut einen Zettel vor (hier Namen von Inselgruppen, z.B. „Azoren“) und wird gegebenenfalls von der Versuchsbetreuung korrigiert.

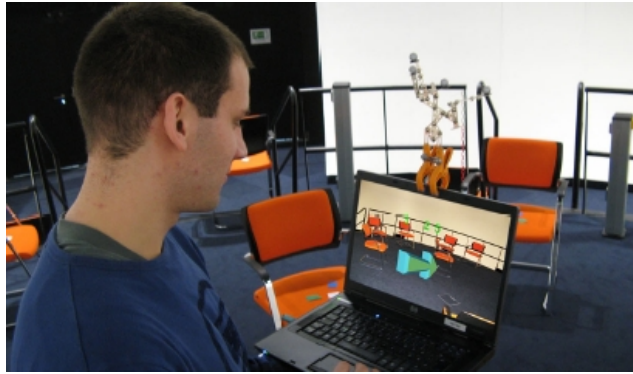
Die AR-unterstützten Navigationsverfahren enthalten gegenüber der Papierkarte zusätzliche, intuitiv verständliche Informationen. Es wird angenommen, dass bei der Verwendung expliziter Navigationsangaben eine geringere kognitive Belastung und somit eine erhöhte Effizienz beim Abarbeiten der Aufgabe möglich ist. Daher werden folgende Hypothesen aufgestellt:

**V1\_H1:** Die AR-unterstützten Verfahren sind der Navigation mittels Papierkarte überlegen, sodass mit AR-Unterstützung die Arbeitsaufgabe schneller ausgeführt wird.

**V1\_H2:** Die explizite Pfeilnavigation ist der impliziten Navigation in der Durchführungsdauer überlegen.

**V1\_H3:** Die explizite Pfeilnavigation verursacht weniger Fehler als die implizite Navigation mit Kartendarstellung.

Abbildung 4.13: Proband navigiert mittels expliziter Pfeilnavigation



Quelle: Eigene Aufnahme

Am Versuch nahmen 13 Personen (Altersdurchschnitt 28,3 Jahre) freiwillig teil, die alle erfahren im Umgang mit AR / VR-Technologien waren. Zu Beginn wurden Personendaten (z.B. „Lebensalter“) per Fragebogen abgefragt. Die Versuche wurden in gleichverteilt-zufälliger Reihenfolge in einer geschlossenen Versuchsumgebung durchgeführt, wobei alle Personen jedes Navigationsverfahren absolvierten. Abbildung 4.13 zeigt einen Probanden beim Absolvieren eines Versuchsabschnitts.

Tabelle 4.4 stellt die Ergebnisse (Zeit und Fehler) der Versuchsdurchführung dar.

Tabelle 4.4: Ergebnisse des Versuches

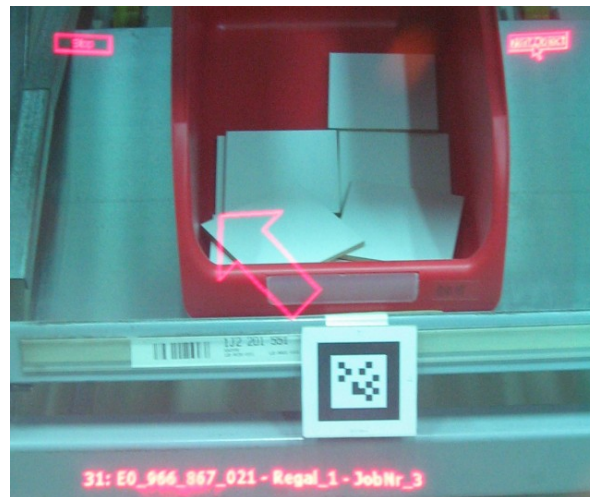
Größe	Papierkarte	2D-YAH	3D-Pfeil
⊙ Zeit	291 (±67) Sek.	267 (±38) Sek.	257 (±28) Sek.
⊙ Fehler je Route	< 1	< 1	< 1

Sowohl die Navigation mit der impliziten 2D-YAH-Karte als auch mittels explizitem 3D-Pfeil war schneller als eine Navigation mit Papierkarte, **V1\_H1** wurde somit bestätigt. Die Navigation mit 3D-Pfeil war zwar das schnellste aller Verfahren, jedoch nur ca. 5% schneller als die 2D-YAH-Navigation. Der festgestellte Unterschied zwischen implizitem und explizitem Verfahren ist somit nicht signifikant ( $p = 0,228$ ; T-Test). In der Standardabweichung unterschieden sich beide AR-gestützten Verfahren um ca. 25%, so dass die explizite Navigation gegenüber der Papierliste tendenziell besser abschneidet ( $p = 0,061$ ; T-Test) als die implizite gegenüber der Papierliste ( $p = 0,148$ ; T-Test). **V1\_H2** kann jedoch weder bestätigt noch abgelehnt werden. Die Anzahl der Fehler war bei allen Verfahren mit einem Fehler je absolvierten Route sehr gering, es konnte kein Vorteil eines Verfahrens gegenüber den anderen Verfahren festgestellt werden. **V1\_H3** wird somit nicht bestätigt.

Die AR-gestützten Verfahren erwiesen sich in beiden Varianten zeitlich effizienter als das nicht-AR-gestützte Verfahren, was für die Verwendung von AR zur Bewältigung von Navigationsaufgaben spricht. Die explizite Navigation war im beschriebenen Versuch zwar nicht signifikant, jedoch messbar schneller als die implizite. Um die Unterschiede zwischen den Verfahren detailliert herauszuarbeiten sind zusätzliche Tests mit mehr Probanden über einen längeren Zeitraum erforderlich.

Um zu entscheiden, welche AR-gestützte Form der Navigation für den Referenzarbeitsplatz umgesetzt werden soll, sind die hier ermittelten Ergebnisse ausreichend. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde entschieden, für das Referenzarbeitsplatz-AR-System eine **explizite Pfeilnavigation** umzusetzen.

Abbildung 4.14: Sicht durch das HMD bei Einblendung eines Pfeils



Quelle: Eigene Aufnahme

Wenn das Ziel nicht im Sichtfeld der Kamera liegt, wird die Zielposition relativ zur aktuellen Position ermittelt und ein transparenter 2D-Pfeil in Richtung des Ziels angezeigt (Abbildung 4.14). Diese 2-dimensionale Darstellung wird für das verwendete nicht-stereoskopische HMD als ausreichend eingeschätzt [HGR08].

#### 4.4.4 Weitere Systemkomponenten

Für den Einsatz im Referenzarbeitsplatz ist es erforderlich, dass die verwendeten Systemkomponenten den Anwender nicht belasten. Daher ist der Einsatz schwerer rucksackgetragener Laptops nicht möglich (vgl. [PST04]). Anstelle dessen wird ein UMPC (Sony Vaio UX1XN) eingesetzt, der in einem Schultergurt getragen werden kann und durch sein geringes Gewicht (486 g) den Anwender verglichen zum Laptop kaum stört. Die Interaktion mit dem AR-System ist über eine Unterarm-Tastatur möglich.

Für das Tracking am Referenzarbeitsplatz wird das industriell etablierte Markertracking „Unifeye SDK“ der Fa. metaio eingesetzt. Alle Kisten im Regalbereich sind mit einem Unifeye-Papiermarker versehen, dessen Lage und Orientierung im Raum durch die Auswertung des Bildes einer am HMD angebrachten Kamera ermittelt wird. Gegenüber anderen Trackingverfahren bietet dieses eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig geringen Anschaffungs- und laufenden Kosten.

Der UMPC dient für das Tracking, nicht jedoch für die eigentliche Visualisierung. Wird das korrekte Ziel gefunden, so sendet der UMPC an den zum HMD gehörigen Nomad-PDA, an welcher Stelle im Display ein lagerichtiges Rechteck als Markierung des Ziels (Abbildung 4.15) zu zeichnen ist. Andernfalls wird ein 2D-Pfeil in Richtung des korrekten Ziels im HMD gezeichnet. Zusätzlich wird stets die aktuelle Regalnummer, die aktuelle Teilenummer und eine laufende Nummer angezeigt.

Als See-Through-Kalibrierung wird eine Eigenentwicklung basierend auf dem SPAAM-Algorithmus verwendet, durch die schnell mit einem Ein-Schritt-Verfahren kalibriert werden kann (Verfahren beschrieben in Kapitel 5.2.3).



Abbildung 4.15: Sicht durch das HMD bei Einblendung eines Rechtecks



Quelle: Eigene Aufnahme

#### 4.4.5 Zusammenfassung

In den vorigen Kapiteln wurden für das Gesamtsystem folgende Eigenschaften festgelegt:

- Eingabe
  - Markertracking (Kapitel 4.4.4)
  - Unterarmtastatur (Kapitel 4.4.4)
- Verarbeitung
  - im Schultergurt getragener UMPC (Kapitel 4.4.4)
  - metaio Unifeye SDK (Kapitel 4.4.4)
- Ausgabe
  - Microvision Nomad ND2100 HMD (Kapitel 4.4.2)
  - Visualisierung mittels expliziter Pfeilnavigation (Kapitel 4.4.3)
- Kommunikation der beteiligten Systemkomponenten mittels WLAN (Kapitel 4.3.5)

Für den weiteren Verlauf der Arbeit stellt dieses System die Ausgangsbasis dar.

---

## 4.5 Durchführung der Beanspruchungsanalyse am Referenzarbeitsplatz

Nach der Erstellung des Referenzarbeitsplatzes und eines mobilen AR-Systems ist die Durchführung einer Pilotuntersuchung notwendig, die am Referenzarbeitsplatz Leistungs- und Beanspruchungsdaten beim Langzeiteinsatz eines AR-gestützten und eines nicht-AR-gestützten Assistenzsystems vergleicht.

### 4.5.1 Versuchsplanung

Im nachfolgend beschriebenen Test sollen im Sinne der in 4.1 beschriebenen Gesamtziele vier konkrete Untersuchungen am Referenzarbeitsplatz durchgeführt werden:

1. Untersuchung der Eignung der gewählten Beanspruchungsmaße für die Bewertung der psychophysiologischen Beanspruchung beim Einsatz der AR-Technologie

2. Vergleich der subjektiven und objektiven Beanspruchungslage bei einer **AR**-gestützten und einer nicht-**AR**-gestützten Tätigkeit zur Evaluierung der Langzeittauglichkeit des vorgeschlagenen **AR**-Systems
3. Erkennen von Schwachstellen am bisher eingesetzten **AR**-System
4. Analyse der Arbeitsqualität und -quantität im Bezug zur Beanspruchung beim Einsatz der **AR**.

Hierfür wurde ein Probandenversuch entworfen, bei dem die Arbeitsaufgabe aus zwei Stunden kontinuierlicher Kommissionierarbeit besteht, wobei der Einsatz eines **AR**-Systems und eines nicht-**AR**-gestützten Verfahrens verglichen wird.

### Vorbereitung

Für die Versuchsgruppe sind nur Teilnehmer im Alter von 20-35 Jahren zugelassen, die nicht durch Faktoren beeinflusst sind, die deutliche Auswirkungen auf die vegetative Balance haben (z.B. Einnahme von  $\beta$ -Blockern, Diabetis Mellitus, Alkohol- oder Drogenmissbrauch) und die keine Gleitsichtbrille tragen. Die Teilnehmergruppe wird auf gesunde männliche Teilnehmer begrenzt, um den Confounder „Geschlecht“ auszuschließen.

Die Versuchsdurchführung findet in den Zeiten 12-15 Uhr und 15-18 Uhr statt, wobei die Zahl der Probanden bei beiden Zeitabschnitten randomisiert gleichverteilt ist. Eine wesentliche Beeinflussung der Beanspruchungsdaten durch den Biorhythmus ist für die beiden Versuchsabschnitte nicht gegeben. Wenn ein Proband einen Versuch um 12 Uhr bzw. 15 Uhr beginnt, muss sein zweiter Versuch an einem anderen Tag ebenfalls 12 Uhr bzw. 15 Uhr beginnen. Die Probanden werden gebeten, entspannt und ausgeruht zu den Tests zu erscheinen.

Als Versuchsumgebung wird der in Kapitel 4.3 beschriebene Referenzarbeitsplatz genutzt, der eine realistische Belastung der Probanden bei gleichzeitig gut quantifizierbarem Arbeitsergebnis (Fehler, Arbeitszeit) ermöglicht. Das für die Versuche genutzte **AR**-System besteht aus dem zuvor beschriebenen Microvision Nomad ND2100, welches per **WLAN** mit einem per Schultergurt ebenfalls mitgeführten **UMPC** verbunden ist.

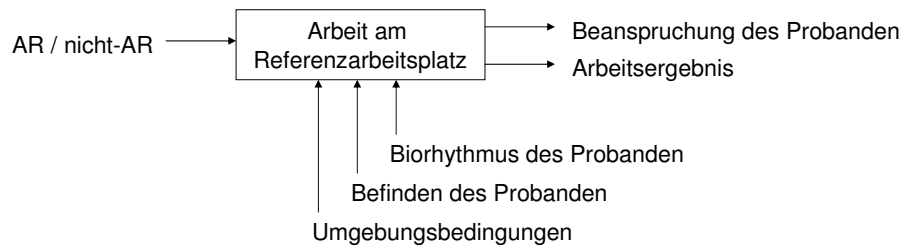
Vor Beginn und nach Beendigung der Kommissioniertätigkeit wird die aktuelle Befindlichkeit durch den Beschwerdefragebogen, die **BFS** und die **EZ-Skala** erfasst sowie aktuelle Beschwerden und der Trainingszustand der Probanden erfragt. Während der Versuche werden **EKG**-Rohdaten durch den Langzeit-**EKG**-Rekorder zur Bestimmung der **HRV** aufgezeichnet. Unterstützt durch die automatisierten Auswertungsfunktionen der Auftragsgenerierung ermittelt die Versuchsbetreuung während des Versuchs die Arbeitsschrittdauer, Fehleranzahl und Fehlerart.

Vor Beginn der Versuche werden die Teilnehmer über Ablauf und Zweck informiert (Anhang A.2). Es wird mithilfe des „The hole in the card“-Tests [Gri82] die Augendominanz ermittelt und durch den Beschwerdefragebogen, die **BFS** sowie die **EZ-Skala** die aktuelle Befindlichkeit des Probanden erfragt. Danach wird der **EKG**-Rekorder angelegt und die Personen absolvierten eine Ruhephase von 10 Minuten im Liegen. Direkt im Anschluss daran wird eine weitere Ruhephase im Stehen durchgeführt, da andernfalls nicht zweifelsfrei geklärt werden kann, ob der Anstieg der Beanspruchung durch das Aufstehen oder den Beginn der Arbeit entsteht. Danach findet der Hauptteil des Versuches



statt, wobei die Probanden möglichst wenig reden sollen, um Störungen in den **EKG**-Daten zu vermeiden. Während der gesamten Versuchsdurchführung werden bei den Probanden in allen Phasen mithilfe des Langzeit-**EKG**-Rekorders die Herzaktionen kontinuierlich aufgezeichnet, um daran im Anschluss am Institut für Arbeitsmedizin die **HRV**-Analyse vorzunehmen.

Abbildung 4.16: Abhängige und unabhängige Variablen



Quelle: Eigener Entwurf

Die unabhängige Variable stellt für diesen Versuch die Wahl des Verfahrens (**AR**-basiert oder nicht **AR**-basiert) dar. Durch das Untersuchungskonzept wird versucht, die Umgebungsbedingungen sowie nutzerbezogene Variablen (Biorhythmus, Befinden) stabil zu halten, sodass sie das Ergebnis nicht als Störvariable beeinflussen. Die abhängigen Variablen stellen das Arbeitsergebnis (Arbeitsschrittdauer, Anzahl kommissionierter Teile, Fehleranzahl, Fehlerart) sowie die Beanspruchung des Probanden dar (Abbildung 4.16).

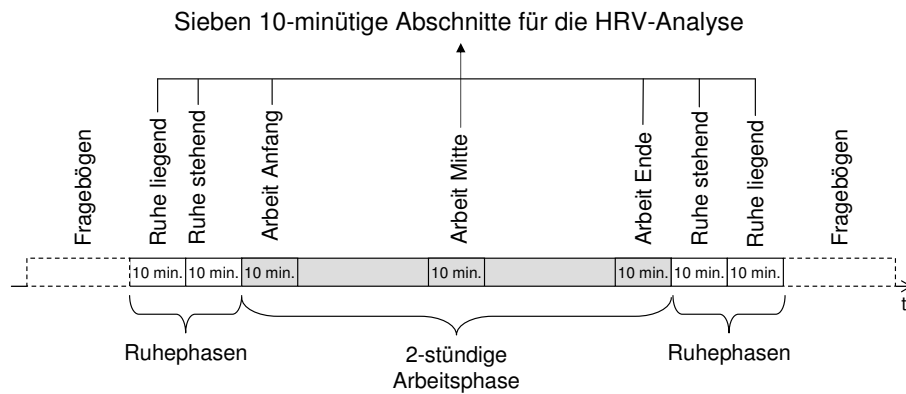
### Durchführung

Innerhalb des Versuchsbereiches erfüllen die Probanden Kommissionieraufträge. Jeder Proband bekommt nacheinander mehrere Joblisten mit je 15 Elementen, die entweder vollständig auf eine Papierliste gedruckt oder sequenziell per **AR** abrufbar sind, wobei Mehrfachaufrufe und gleiche Teilesequenzen auftreten können:

- Entweder steht der vollständige Auftrag auf einer Papierliste (*nicht-AR-gestützte Tätigkeit* „mit Papierliste“), wobei die Liste von oben nach unten abzuarbeiten ist und dabei keine Wegeoptimierung vorgenommen werden darf,
- oder der auszuführende Auftrag wird per **HMD** als Kombination aus Text (Teilenummer, Regalnummer, laufende Nummer) und Hinweisobjekten (lagerrichtige Rechtecke, Pfeile) angezeigt (*AR-gestützte Tätigkeit* „mit **AR**-System“). Wenn ein Zielfach gefunden und somit ein Teil entnommen wird, quittiert der Proband per Druck auf die Leertaste einer Unterarm-Tastatur die Entnahme und fordert damit den nächsten Teilauftrag von der Auftragsgenerierung an.

Jeder Proband absolviert beide Verfahren. Die Auswahl und Reihenfolge der einzelnen Elemente ist innerhalb einer Jobliste zufällig, aber für alle Probanden gleich, sodass je Jobliste ca. 60 m Weg zu absolvieren sind. Um Fehler bei der Rückkommissionierung zu vermeiden, sind alle Teile mit einer zweistelligen Fachnummer beschriftet, die nicht mit der Teilenummer identisch ist und es wird vor der eigentlichen Rückkommissionierung eine Vorsortierung durch die Versuchsbetreuung vorgenommen.

Abbildung 4.17: Ablauf der Versuchsdurchführung in einzelnen Zeitabschnitten



Quelle: Eigener Entwurf

## Auswertung

Abbildung 4.17 stellt den Ablauf der Versuchsdurchführung sowie die Abschnitte der HRV-Analyse dar. Die HRV-Daten werden nach Abschluss des Versuchsdurchlaufs in sieben Abschnitten von jeweils 10-minütiger Dauer analysiert. Bei den einzelnen der sieben Abschnitte handelt es sich um die beiden Ruhephasen vor dem Versuch, drei Belastungsphasen während der eigentlichen Tätigkeit zu Beginn, in der Mitte und gegen Ende der Arbeitsphase sowie um die beiden Erholungsphasen nach Abschluss des Versuchs. Ein 10-minütiger Aufzeichnungsabschnitt reicht für die Ermittlung der HRV aus, da dabei genügend einzelne Grund-Schwingungselemente erfasst werden [PBS<sup>+</sup>07] und ist zudem sinnvoll, weil für die Analyse im Frequenzbereich Zeitabschnitte von deutlich weniger als einer Stunde empfohlen werden [CBM95].

Die Aufnahme und Auswertung der Daten Arbeitsschrittdauer, Anzahl kommissionierter Teile, Fehleranzahl und Fehlerart geschieht automatisiert während des Versuches durch die Auftragsgenerierung.

### 4.5.2 Arbeitshypothesen

In der hier beschriebenen Untersuchung sollen vier unterschiedliche Ziele erreicht werden (vgl. Kapitel 4.5.1), dementsprechend wurden Arbeitshypothesen aufgestellt. Zunächst gilt es zu erkennen, ob die gewählten Beanspruchungsmaße für die Untersuchung nutzerbezogener Parameter beim Einsatz der AR-Technologie geeignet sind.

**V2\_H1:** Der Einsatz der EZ-Skala, der Befindlichkeitsskala und des Beschwerdefragebogens sowie die HRV-Analyse eignen sich zur Bewertung der Beanspruchung beim Einsatz der AR-Technologie am Referenzarbeitsplatz.

Ein weiteres Ziel ist die Untersuchung der jeweiligen Beanspruchungssituation vor und nach der Arbeit mit und ohne AR-System. Die Kommissioniertätigkeit am Referenzarbeitsplatz stellt sowohl körperliche als auch motivationale Anforderungen an die Probanden. Grundsätzlich stellt dabei der Einsatz zusätzlicher körpergetragener Arbeitsmittel, so auch eines AR-Systems, eine zusätzliche Belastung für den Anwender dar.

**V2\_H2:** Die objektive und subjektive Beanspruchung nach der

Arbeit ist höher als vor der Arbeit. Dies gilt sowohl für die Arbeit mit dem AR-System als auch mit dem nicht-AR-System.

**V2\_H3:** Die objektive und subjektive Beanspruchung liegt beim Einsatz eines AR-Systems höher als bei der Arbeit ohne AR-System.

Die dritte zu bearbeitende Fragestellung betrifft Schwachstellen am bisher eingesetzten AR-System neben der Beanspruchungssituation. Da die heutigen HMDs nicht in vollem Umfang den gestellten Anforderungen entsprechen (siehe Kapitel 4.4.2) und grundsätzliche Fragestellungen zu Interaktions- und Visualisierungsmetaphern offen sind (siehe Kapitel 3.4), wird folgende Hypothese aufgestellt:

**V2\_H4:** Das Arbeitsergebnis beim Einsatz des AR-Systems ist schlechter als beim Einsatz des nicht-AR-Systems.

Da bei dieser Untersuchung beim Einsatz des AR-System sowohl die Beanspruchungssituation als auch das Arbeitsergebnis evaluiert werden, können Arbeitsqualität und -quantität in Bezug zur Beanspruchung analysiert werden.

**V2\_H5:** Verschlechtert sich die Beanspruchungssituation des Probanden beim Einsatz der AR, so verschlechtert sich auch das Arbeitsergebnis.

### 4.5.3 Ergebnisse und Auswertung

Insgesamt nahmen 20 Personen (Durchschnittsalter 25,9 Jahre  $\pm$  2,81), die alle bereits Erfahrung mit AR oder VR hatten, freiwillig an der Untersuchung teil. Abbildung 4.18 zeigt einen Probanden beim Kommissionieren mit AR-Unterstützung. Die Hälfte aller Probanden begann mit dem nicht-AR-Versuch, die andere Hälfte begann mit AR.

Durch die genutzten Analyseverfahren konnte am Referenzarbeitsplatz die objektive und subjektive Beanspruchung ermittelt und analysiert werden. Die erfassten Daten wurden durch das Institut für Arbeitsmedizin mittels Microsoft Excel aufbereitet und statistisch mit SPSS 15.0 ausgewertet. Die Testentscheidungen basieren auf einem Signifikanzniveau von 5%. Zur Darstellung der Ergebnisse wurden Mittelwerte und Standardabweichungen (MW  $\pm$  SD) genutzt. In den folgenden Diagrammen werden statistische Unterschiede wie folgt gekennzeichnet:

tendenzieller Unterschied (Signifikanzwert  $p < 0,10$ ): **t**  
signifikanter Unterschied (Signifikanzwert  $p < 0,05$ ): **\***

Im Falle eines nicht-signifikanten Ergebnisses wird kein Zeichen verwendet. Der Signifikanzwert  $p$  ist ein Indikator dafür, wie wahrscheinlich es ist, ein Ergebnis zu erhalten, das so extrem ist, wie das erhaltene, und zwar unter der Voraussetzung, dass die zuvor getroffene Annahme (Nullhypothese) zutrifft [Lau09].

### Subjektive Beanspruchung

**Beschwerdefragebogen** Der Gesamtvergleich der Beschwerdefragebögen mittels Wilcoxon-Test (Daten vor der Arbeit zu Daten nach der Arbeit) zeigte, dass allgemein die Arbeit am Referenzarbeitsplatz mit der Papierliste und

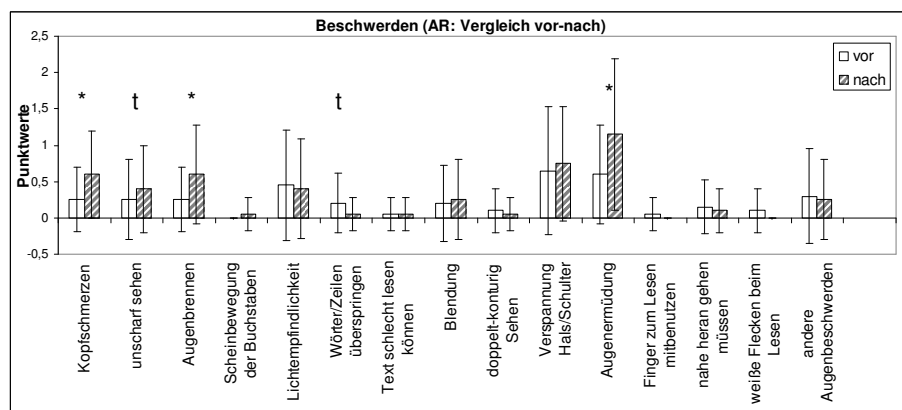
Abbildung 4.18: Proband beim Kommissionieren mit AR-System am Referenzarbeitsplatz des Fraunhofer IFF Magdeburg



Quelle: Eigene Aufnahme

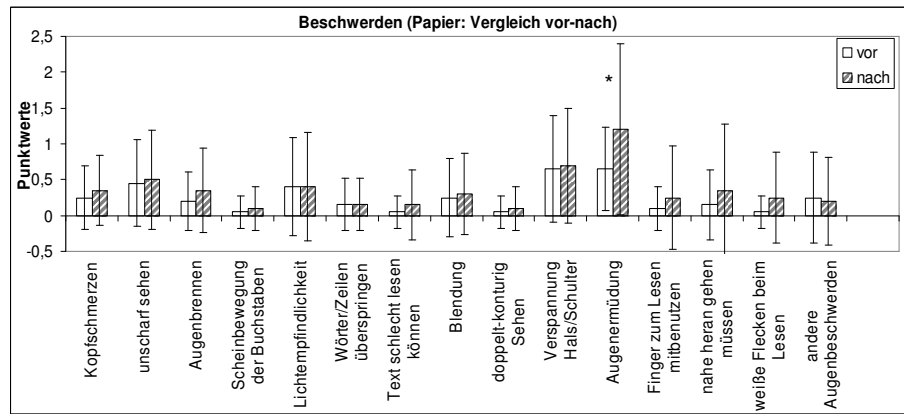
mit dem AR-System eine Belastung für das visuelle System darstellt. Dabei wurde deutlich, dass die Arbeit mit dem AR-System eine signifikante Zunahme der Beschwerden „Kopfschmerzen“ ( $p = 0,020$ ), „Augenbrennen“ ( $p = 0,020$ ) und „Augenermüdung“ ( $p = 0,022$ ) hervorrief, „unscharfes Sehen“ ( $p = 0,083$ ) verstärkt sich tendenziell und „Überspringen von Wörtern / Zeilen“ ( $p = 0,083$ ) nimmt tendenziell ab (Abbildung 4.19). Dabei war die Steigerung aller genannten Beschwerden bei den Versuchspersonen, die keine Sehhilfe tragen, deutlicher ausgeprägt als bei den Probanden mit Sehhilfe (Vergleich der Mittelwertdifferenzen). Bei der Arbeit ohne AR-System zeigte lediglich die „Augenermüdung“ einen signifikanten Anstieg ( $p = 0,038$ ; Wilcoxon-Test, Abbildung 4.20).

Abbildung 4.19: Ergebnisse des Beschwerdefragebogens vor und nach dem Test mit AR



Quelle: Eigener Entwurf

Abbildung 4.20: Ergebnisse des Beschwerdefragebogens vor und nach dem Test mit der Papierliste

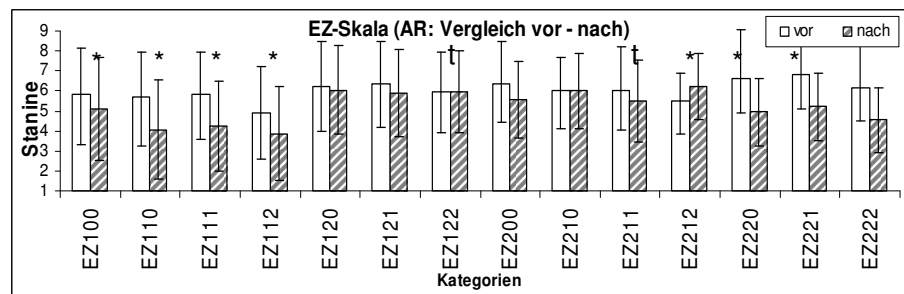


Quelle: Eigener Entwurf

Insgesamt ergab die Analyse dieser Fragebogendaten, dass der Einsatz des mobilen AR-Systems eine höhere subjektive Beanspruchung des visuellen Systems bewirkt als der Einsatz des nicht-AR-Systems „Papierliste“.

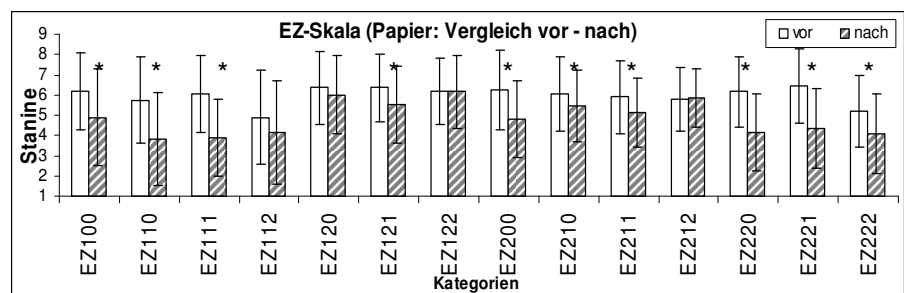
**Eigenzustandsskala (EZ-Skala)** Durch die EZ-Skala wurde ersichtlich, dass sich insgesamt sowohl die Motivations- als auch Beanspruchungslage beim Vergleich von vorher zu nachher beim Einsatz der AR signifikant verschlechterte, dies liegt jedoch ähnlich wie bei dem nicht-AR-Verfahren.

Abbildung 4.21: Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit AR



Quelle: Eigener Entwurf

Abbildung 4.22: Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit Papierliste

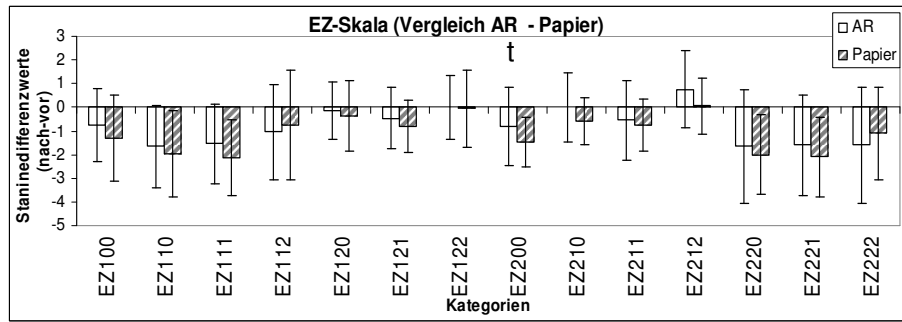


Quelle: Eigener Entwurf

Aus den Abbildungen 4.21 und 4.22 wird deutlich, dass sich sowohl bei der Papierliste als auch beim Einsatz des AR-Systems die EZ-Faktoren 100, 110, 111, 220 und 221 signifikant im Vergleich vorher zu nachher ändern. Nur bei der Papierliste ändert sich zusätzlich 121, 200, 210, 211 und 222 signifikant, während sich beim AR-System 112 signifikant und 122 sowie 211 tendenziell ändern. Daraus wird geschlussfolgert, dass beide Assistenzsysteme unterschiedliche Faktoren des Eigenzustandes beeinflussen.

In der Differenz der Stanine-Werte beider Verfahren vorher und nachher sind keine signifikanten Unterschiede erkennbar (Abbildung 4.23), lediglich ein

Abbildung 4.23: Vergleich der Differenzen der Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit AR und Papierliste

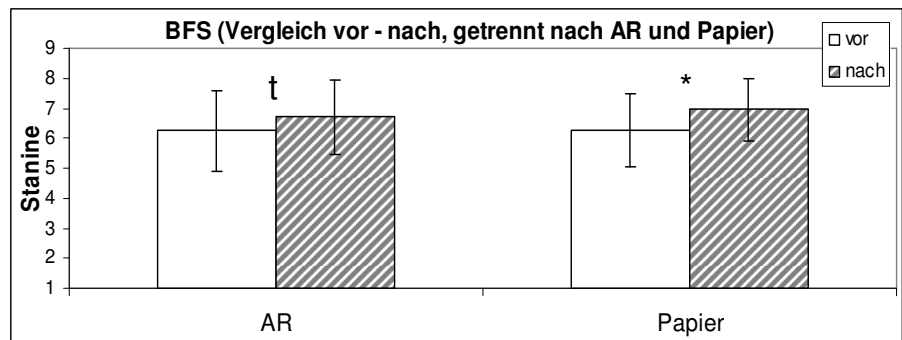


Quelle: Eigener Entwurf

tendenzieller Unterschied ( $p = 0,072$ ; Mann-Whitney-Test) bei Faktor EZ200 (Handlungsfähigkeit). Dies deutet darauf hin, dass sowohl der nicht-AR- als auch der AR-Einsatz Beanspruchungen bewirken, die in einem vergleichbaren Rahmen liegen.

Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass durch den Einsatz eines AR-System keine stärkere subjektive Verschlechterung des Gesamtbefinden bewirkt wird als beim Einsatz der Papierliste.

Abbildung 4.24: Ergebnisse der BFS vor und nach dem Test mit AR und Papierliste



Quelle: Eigener Entwurf

**Befindlichkeitsskala (BFS)** Insgesamt war mithilfe der BFS über beide Kommissionierverfahren ein signifikanter Anstieg ( $p = 0,001$ ; Wilcoxon-Test) und somit eine Verschlechterung des Befindens erkennbar. Die Daten nach Versuchsdurchführung zeigen beim Einsatz der AR und der Papierliste eine vergleichbare Veränderung der Stanine-Werte, wobei nach dem Einsatz der AR ein tendenzieller ( $p = 0,064$ ; Wilcoxon-Test) und beim Einsatz der Papierliste ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,005$ ; Wilcoxon-Test) deutlich wurde (Abbildung 4.24).

Der Differenzwert des Stanine-Wertes war bei beiden Verfahren ähnlich und nicht signifikant ( $p = 0,203$ ; Mann-Whitney-Test). Dies deutet auf eine ähnliche Beanspruchung bei beiden Verfahren hin.

**Zusammenfassung zur subjektiven Beanspruchung** Aus der Analyse der Beschwerdefragebögen geht hervor, dass der Einsatz des mobilen AR-Systems eine höhere Beanspruchung für das visuelle System des Nutzers bewirkt als der Einsatz der Papierliste. Die Analyse der BFS und EZ-Skala deuten darauf hin, dass dennoch der Einsatz des mobilen AR-Systems das subjektive Gesamtbe-finden nicht stärker verschlechtert als der Einsatz der Papierliste.



Durch den Einsatz der **BFS** wurden ähnliche Ergebnisse ermittelt, wie durch die **EZ-Skala**, die Ergebnisse korrelieren. Da der **EZ-Skala** eine detaillierte Faktorenhierarchie zugrunde liegt, die in zukünftigen Analysen vorteilhaft sein kann, sollte in nachfolgenden Untersuchungen die **EZ-Skala** erneut eingesetzt werden. Die **BFS** bietet keinen zusätzlichen Mehrwert gegenüber der **EZ-Skala**.

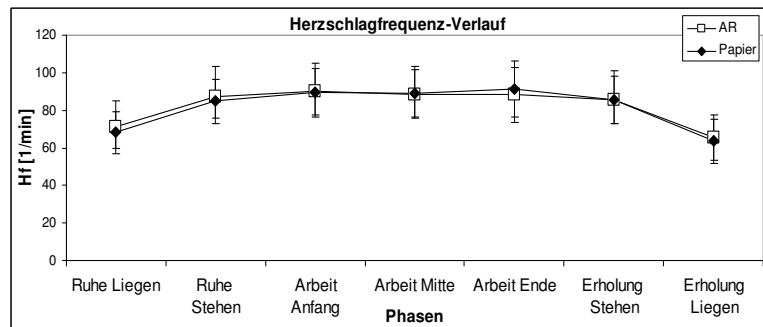
### Objektive Beanspruchung

Wie in Kapitel 4.3.7 (Seite 68) beschrieben, wird die **HRV**-Analyse für die objektivierte Beanspruchungsanalyse eingesetzt. Hierbei werden folgende Parameter ausgewertet:

- Verlauf der Herzschlagfrequenz
- Verlauf der SDNN (Standardabweichung aller RR-Intervalle in [ms])
- Verlauf des LF/HF-Quotient (Verhältnis der niederfrequenten zur hochfrequenten Leistung)

Für die Analyse wurde der Versuch in sieben Phasen eingeteilt, die für die Vergleichbarkeit im Leistungsspektrum (Frequenzbereich) jeweils aus 10-minütigen Abschnitten bestanden (vgl. Abbildung 4.17).

Abbildung 4.25: Verlauf der Herzschlagfrequenz während der sieben Versuchsphasen



Quelle: Eigener Entwurf

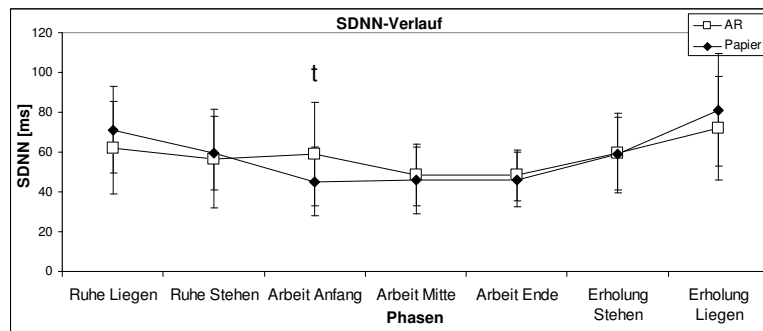
Zunächst wurde die Herzschlagfrequenz analysiert (Abbildung 4.25), welche sich unter Sympathikuseinfluss erhöht und unter parasympathischem Einfluss abnimmt. Die Herzschlagfrequenz ändert sich beim Übergang von der ersten zur zweiten Ruhephase sowie bei Beginn der Arbeit und umgekehrt. Im Verlauf der Arbeit sind jedoch keine signifikanten Veränderungen der Herzschlagfrequenzwerte zwischen **AR**- und **Papier**-Variante in den drei Arbeitsphasen ersichtlich ( $p = 0,942$ ; Friedmann-Test).

Nach Abschluss des Versuches kehrt die Herzschlagfrequenz wieder zum Ausgangswert zurück, was für einen vollständigen Beanspruchungsabbau spricht. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen **AR** und **Papier**liste während der sieben Phasen ermittelt (Friedmann-Test).

Die SDNN ist gemäß ihrer Definition ein Maß der Herzratenvariabilität selbst (siehe S. 69). Eine geringer Wert der SDNN deutet auf eine hohe Beanspruchung hin. Bei der Auswertung der SDNN (Abbildung 4.26) wird zu Beginn der Arbeitsphase eine tendenziell geringere Beanspruchung ( $p = 0,053$ ; T-Test) sowie eine große Standardabweichung beim Einsatz der **AR** ersichtlich. Dies verdeutlicht starke interindividuelle Schwankungen der Beanspruchung beim Anwenden der Technologie. Eine mögliche Ursache dafür könnte die



Abbildung 4.26: Verlauf der SD-NN während der sieben Versuchsphasen

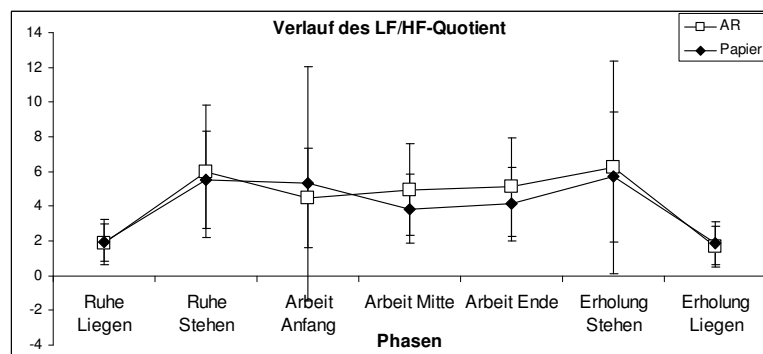


Quelle: Eigener Entwurf

notwendige Gewöhnungsphase an die Technologie sein, die bei den Probanden unterschiedlich stark ausgeprägt war.

Nach zwei Stunden Arbeit konnten durch die Analyse der SDNN keine signifikanten Unterschiede zwischen Arbeit mit AR und Papier erkannt werden.

Abbildung 4.27: Verlauf von LF zu HF während der sieben Versuchsphasen



Quelle: Eigener Entwurf

Das Verhältnis aus LF- zu HF- Leistung repräsentiert sowohl den sympathischen als auch den parasympathischen Anteil der Herzregulation (siehe S. 69), ein hoher Wert deutet auf eine hohe Beanspruchung hin. Im Verlauf des Versuches waren auch bei der LF- zur HF-Leistung keine signifikanten Unterschiede zwischen dem AR- und nicht-AR-Verfahren zu erkennen (Abbildung 4.27). Jedoch sind hier zu Beginn der Arbeitsphase und bei der Erholungsphase im Stehen starke Unterschiede in der mathematischen Standardabweichung sichtbar, was wiederum auf interindividuelle Schwankungen zurückgeführt wird.

Nach zwei Stunden Arbeit konnten durch die Analyse des LF/HF-Quotienten keine signifikanten Unterschiede zwischen Arbeit mit AR und Papier erkannt werden.

### Arbeitsqualität und Arbeitsleistung

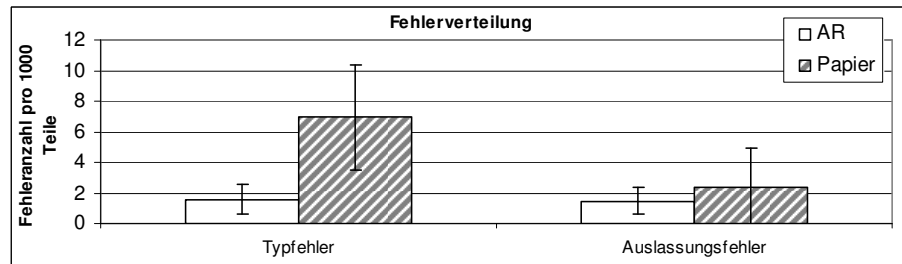
Hypothese V2\_H5 wurde aufgestellt, da ein Zusammenhang zwischen der Beanspruchung und Arbeitsqualität / Arbeitsleistung vermutet wird. Daher wurden neben den Beanspruchungsparametern während der Versuchsdurchführung auch die Fehleranzahl, Fehlerart und Bearbeitungszeiten gemessen.

Bei den Fehlern kann in folgende Fehlerarten unterschieden werden:

- Typfehler
- Auslassungsfehler

Im realen Produktionsalltag ist ein fehlerhaft kommissioniertes Teil von größter Bedeutung, da es Produktionsverzögerungen oder teure Nacharbeit verursachen kann.

Abbildung 4.28: Fehlerverteilung je 1000 kommissionierter Teile

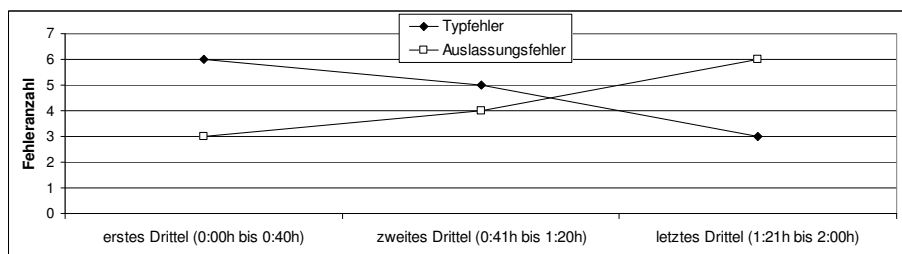


Quelle: Eigener Entwurf

Pro 1000 Teile entstanden bei AR im Schnitt  $1,7 \pm 1,1$  Typfehler und  $1,3 \pm 0,9$  Auslassungsfehler. Mit der Papierliste hingegen wurden  $6,9 \pm 3,5$  Typfehler und  $2,3 \pm 2,6$  Auslassungsfehler registriert (Abbildung 4.28). Insgesamt lag also die Häufigkeit von Fehlern beim AR-System deutlich unter den Fehlern beim Verwenden der Papierliste. Speziell die Typfehlerrate lag bei der Papierliste fast um das vierfache höher, als beim verwendeten AR-System. Hinsichtlich der Typfehler ist das AR-System tendenziell besser als die Papierliste ( $p = 0,064$ ; T-Test). Unterschiede beim Auslassungsfehler sind nicht signifikant ( $p > 0,1$ ; T-Test).

Verglichen zu anderen nicht-AR-basierten Kommissionierverfahren (vgl. ten Hompel und Schmidt 2004, [tHS04]) liegt das verwendete AR-System bezüglich der Fehlerraten mit ca. 1,5 Fehlern je 1000 Teile knapp oberhalb des Niveaus von Pick-by-Voice (0,8 Fehler je 1000 Teile) und ist deutlich besser als übliche Fehlerraten von Pick-by-Light (4,0 Fehler je 1000 Teile).

Abbildung 4.29: Fehlerverteilung in drei Versuchsabschnitten



Quelle: Eigener Entwurf

Es wurde deutlich, dass zu Beginn der AR-Tätigkeit häufiger falsch kommissioniert wurde als gegen Ende (Abbildung 4.29). Dies lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass die Versuchsteilnehmer zunächst das System überschätzten. So griffen Probanden zu Beginn der Arbeitsphase sofort beim ersten Anzeigen der Zielmarkierung in das entsprechende Fach - obwohl die Einblendung durch eine Latenz von ca. 250 ms verzögert dargestellt wurde und somit möglicherweise ein Nachbarfach das korrekte Ziel war. Da der Vergleich dieser AR-gestützten Anwendung mit einer bekannten, etablierten Anwendung mobiler AR bisher nicht möglich ist, müssen andere Anwendungsfelder zum Vergleich herangezogen werden. Die von den Probanden durchzuführende Wahrnehmung und Interpretation der HMD-Informationen und der anschließenden Navigation im Referenzarbeitsplatz kann möglicherweise mit der Auswertung von Informationen in einem durch Head-Up-Displays gestützten Flugzeugcockpit verglichen werden. Zur Latenz ist dort bekannt, dass bei anspruchsvollen Navigationsaufgaben eine Latenz von 250-300 ms deutlich zu

hoch ist [BAWK05], weshalb für die Darstellung einfacher Fluginformationen auf Head-Up-Displays der US Navy eine maximale Latenz von 100 ms vorgeschrieben ist [BAW04]. Daher wird angenommen, dass die hohe Latenz am Referenzarbeitsplatz ebenfalls deutlich zu hoch ist.

Eine andere Fehlerquelle stellte die verwendete See-Through-Kalibrierung dar, durch welche die Einblendungen

- im Randbereich des Displays sowie
- bei großen Entfernungen

um einige Zentimeter versetzt dargestellt wurden. Positionierte sich der Proband jedoch so vor dem Ziel, dass er aus ca. 1 m Entfernung mittig auf das Ziel schaute, wurde die Einblendung korrekt dargestellt.

Bei der Papierlistenkommissionierung hingegen wurden Teile falsch kommissioniert durch fehlerhaftes Ablesen der Teilenummern von der Auftragsliste oder vom Regal. Weiterhin entstanden Fehler, wenn die Probanden versuchten, sich die Lagerorte der Teile einzuprägen, da dies nicht immer gelang. Ebenso wurden oftmals Teile vergessen (Auslassungsfehler) oder zu viel geholt, wenn nicht auf eine korrekte Abarbeitung der Liste geachtet wurde.

Neben der Vermeidung von Fehlern bietet die AR das Potenzial, Ausführungszeiten manueller Arbeitsschritte zu verkürzen [Alt02]. Mit dem hier genutzten AR-System gelang dies nicht, das AR-System war tendenziell langsamer als die Papierliste (AR:  $223 \pm 5,6$  Teile pro Stunde, Papier:  $321 \pm 9,4$  Teile pro Stunde,  $p = 0,0879$ ; T-Test), im Durchschnitt unterscheiden sich die Werte um 30%. Gründe hierfür waren die zu ungenaue See-Through-Kalibrierung in den Displayrandbereichen, das damit verbundene längere Suchen des Ziels und die bereits angesprochene Latenz der virtuellen Einblendungen. Ebenso negativ wirkten sich die lose am AR-System hängenden Kabel auf die Arbeitsgeschwindigkeit aus.

Für zukünftige Untersuchungen zur Arbeitsleistung beim Einsatz mobiler AR muss daher ein optimiertes System genutzt werden. Für dieses gilt:

- Eine hohe Überlagerungsgenauigkeit durch eine hochwertige STK ist erforderlich.
- Eine Latenz zwischen realem und virtuellem Objekt muss vermieden werden.
- Es darf den Benutzer nicht beim Ausführen seiner primären Arbeitsaufgaben behindern.

Da Fehler der Kategorie „Typfehler“ hohe Kosten durch intensive Nacharbeit oder Produktionsunterbrechungen zur Folge haben können, müssen diese Fehler durch den Einsatz einer möglichst genauen See-Through-Kalibrierung vermieden werden. Untersuchungen zur STK werden daher in Kapitel 5 beschrieben.

### **Sonstiges und Kommentare der Probanden**

Fünf der Probanden hatten links das dominante Auge, 15 rechts. Es konnten keine Unterschiede in subjektiver und objektiver Beanspruchung sowie Arbeitsqualität und Leistung zwischen Probanden mit links- und rechtsdominanten Augen erkannt werden.

Die Resonanz der Probanden auf Einsatz der AR war positiv, zum genutzten AR-System jedoch eher negativ. Die Probanden erkannten alle das Potenzial der AR, zeigten jedoch gleichfalls Mängel des Systems auf. Für einen effizienten Einsatz müssen die HMD-Kopfträger, die Überlagerungsgenauigkeit sowie die System-Latenz verbessert werden. Für den Kommissionierbereich wurde als weitere Anzeigemöglichkeit durch einen Probanden die Gummiband-Metapher („Rubberband“, [SFPK06]) und der 3D-Tunnel [SSH08] vorgeschlagen.

Eine grundsätzliche Schwachstelle des hier verwendeten HMDs stellte der Kopfträger dar: Einige Personen bekamen nach wenigen Minuten Kopfschmerzen, wenn der Kopfträger nicht optimal eingestellt war. In diesem Fall justierten sie sich den Kopfträger neu, passten die STK manuell an und konnten danach mit der Arbeitsaufgabe fortfahren. Aus den Kommentaren der Probanden wird geschlossen, dass die Qualität des verwendeten Kopfträgers eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz von HMD-basierten mobilen AR-Systemen darstellt.

#### 4.5.4 Ergebnisinterpretation und Schlussfolgerungen

Bei dem hier beschriebenen Versuch wurde die Beanspruchungssituation beim Ausführen einer manuellen Tätigkeit mit und ohne AR-System mit einer homogenen Versuchsgruppe untersucht, um die zuvor aufgestellten Arbeitshypothesen zu überprüfen. Dabei wurde Folgendes ersichtlich:

1. **Mithilfe der genutzten Analyseverfahren konnte am Referenzarbeitsplatz neben Untersuchungen zum Arbeitsergebnis die objektive und subjektive Beanspruchungssituation ermittelt und analysiert werden** (Kapitel 4.5.3), Hypothese V2\_H1 wird somit bestätigt. Weitere Untersuchungen am Referenzarbeitsplatz zur Beanspruchung beim Einsatz mobiler AR können demnach mit der hier beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt werden.
2. Die Ergebnisse der subjektiven Messverfahren stützen die Hypothese V2\_H2, da **gegen Ende der zweistündigen Arbeitsphase alle Probanden sowohl mit AR als auch mit Papierliste stärker beansprucht** waren. Dies wird jedoch aus den objektiven Daten auf Basis der HRV nicht ersichtlich, da zum Ende der Arbeitsphase die Probanden ähnlich beansprucht waren, wie zu Beginn. Dies deutet darauf hin, dass bei der Arbeit am Referenzarbeitsplatz insbesondere subjektive Belastungen auf den Anwender einwirken, die in nachfolgenden Untersuchungen verstärkt analysiert werden müssen.
3. Die Hypothese V2\_H3 konnte widerlegt werden, da sowohl beim Einsatz des nicht-AR- als auch beim AR-Verfahren ähnliche Änderungen der Beanspruchung sichtbar wurden. Diese Daten lassen darauf schließen, dass **während eines kontinuierlichen zweistündigen Einsatzes eines AR-System keine signifikante Mehrbelastung durch das AR-System beim Anwender** entsteht. Zusätzliche Versuche mit 8 Stunden Arbeitsdauer sind nötig, um zu überprüfen, ob tatsächlich keine Höherbeanspruchung während eines Vollschichtensatzes der AR-Technologie vorliegt und ob die mobile AR möglicherweise die Beanspruchung gegenüber nicht-AR-Systemen verbessern kann.

4. Durch die Einschränkungen der heute verfügbaren Komponenten zum Aufbau eines auf den industriellen Langzeiteinsatz ausgerichteten mobilen **AR**-Systems hatte das verwendete System mehrere (zuvor bereits genannte) Schwachstellen. Dennoch konnte gezeigt werden, dass die **Arbeitsqualität durch den Einsatz eines mobilen AR-Systems verbessert** werden kann. Mit dem hier eingesetzten **AR**-System konnte die Anzahl der Arbeitsschritte pro Zeit nicht erhöht werden, jedoch wurden beim **AR**-Einsatz weniger Fehler je Zeit registriert. Somit konnte **V2\_H4** weder bestätigt noch widerlegt werden, mit einem verbesserten System sollte diese Fragestellung erneut hinsichtlich der Arbeitsleistung untersucht werden. Da die meisten der Teilnehmer nicht täglich mit dem **AR**-System arbeiten und bisher keine Kommissioniererfahrung hatten, sind hinsichtlich der Fehler und Ausführungszeiten andere Ergebnisse zu erwarten, wenn professionelle und sowohl an das **AR**-System als auch an die Papierliste gewöhnte Kommissionierer für die Versuche eingesetzt werden.
5. Während einer kontinuierlichen, zweistündigen Arbeit mit dem mobilen **AR**-System am Referenzarbeitsplatz trat der Fehlertyp „Auslassungsfehler“ gegen Ende häufiger auf als zu Anfang. Dies **deutet auf einen möglichen Abbau der Konzentration beim Einsatz der mobilen AR nach zwei Stunden am Referenzarbeitsplatz** hin, sodass Hinweise für die Berechtigung von Hypothese **V2\_H5** gegeben sind. Die Hypothese konnte jedoch nicht zweifelsfrei bestätigt bzw. abgelehnt werden. Weitere Untersuchungen sind hier zwingend erforderlich, die auch darauf ausgerichtet sein müssen, solchem Konzentrationsabbau gezielt entgegen zu wirken.

Nach zwei Stunden kontinuierlicher Arbeit konnten keine negativen Nacheffekte auf die Gesamtbeanspruchungssituation beim Einsatz des genutzten **AR**-Systems festgestellt werden. Die wesentliche Aussage der Versuchsergebnisse liegt daher in der Erkenntnis, dass ein zusätzliches Potenzial der **AR** sichtbar gemacht wurde [**TMS<sup>+</sup>08**]: Mit dem hier eingesetzten *suboptimalen* **AR**-System wurde am Referenzarbeitsplatz eine ähnliche Beanspruchungssituation erreicht wie beim Einsatz des herkömmlichen Kommissioniersystems „Papierliste“. Somit liegt die Vermutung nahe, dass durch den Einsatz eines *optimalen* **AR**-System die Beanspruchung gegenüber herkömmlichen Werkerassistenzsystemen verringert werden kann. Die wesentlichen Vorteile beim Einsatz eines **AR**-System in einer industriellen Umgebung werden somit gesehen in der:

- Vermeidung von Fehlern [**Alt02**]
- Verringerung der Durchführungszeit [**Alt02**]
- **Optimierung der Beanspruchung**

Eine wesentliche weitere Erkenntnis wurde aus dem Beschwerdefragebogen ersichtlich und stimmt mit Erkenntnissen früherer Arbeiten (z.B. [**Fri06**]) überein: Es traten bei der Arbeit mit dem **AR**-System vermehrt Beschwerden am visuellen System des Menschen auf, was möglicherweise auf die verwendete Displaytechnologie zurückzuführen ist. Hier gilt es, gezielt zusätzliche ophthalmologische und wahrnehmungspsychologische Untersuchungen durchzuführen.

Zur Beantwortung der Frage, wie ein **AR**-System gestaltet sein muss, damit es effizient ist und den Anwender nicht negativ beeinflusst, sind weitere ähnliche Versuche mit einem deutlich verbesserten **AR**-System und einer längeren Arbeitszeit am Referenzarbeitsplatz nötig. Dabei müssen neben weiteren Tests zur Beanspruchungsbewertung beim Einsatz verschiedener **AR**-Systeme auch Verfahren einbezogen werden, die wahrnehmungspsychologische Aspekte untersuchen.

Mittelfristig kann damit die Erstellung humanzentrierter **AR**-Systeme für die Industrie möglich werden. Diese bieten nicht nur ökonomische Vorteile (Qualität und Arbeitsleistung), sondern können auch positive Wirkungen auf den Anwender im Sinne der Gesundheitserhaltung, Leistungsförderung und Arbeitssicherheit entfalten.

---

## 4.6 Zusammenfassung und Ausblick

Bisher war unklar, welche Auswirkungen der länger andauernde Einsatz eines mobilen **AR**-Systems auf die Beanspruchung des Nutzers hat und welche Beanspruchungsmaße zur Erfassung von Beanspruchungsänderungen beim Einsatz der **AR** geeignet sind. Für die Durchführung entsprechender Untersuchungen wurde daher ein Versuchskonzept entwickelt und ein im Gegensatz zu existierenden Untersuchungen (vgl. [PWS05]) dem realen industriellen Umfeld nahe kommender Referenzarbeitsplatz als Laborversuchsumgebung aufgebaut. An diesem kann die subjektive und objektive Beanspruchung der Nutzer beim Einsatz der mobilen **AR** ermittelt werden. Für diesen Arbeitsplatz wurde ein erstes mobiles **AR**-System erstellt, wobei ersichtlich ist, dass die heute verfügbare Hardware überwiegend nicht den an sie gestellten Anforderungen entspricht. Mit diesem von vornherein als suboptimal erkannten mobilen **AR**-System wurde ein erster Versuch zur Analyse der Beanspruchungslage im Referenzarbeitsplatz durchgeführt.

Vor und nach der Versuchsdurchführung wurden bei jedem Probanden subjektive Beanspruchungsparameter durch die Auswertung von Fragebögen ermittelt. Hierbei zeigte sich insbesondere der Beschwerdefragebogen und die **EZ-Skala** als geeignet für einen wiederholten Einsatz. Für die Analyse der objektiven Beanspruchung wurden durch einen Langzeit-**EKG**-Rekorder bei den Probanden während der Versuchsdurchführung Herzaktionen aufgezeichnet und diese Daten für die Analyse der **HRV** genutzt. Hierbei liegt ein Vorteil der **HRV**-Analyse gegenüber anderen Verfahren zur Beanspruchungsanalyse darin, dass durch dieses Verfahren nicht nur Aussagen zum Beanspruchungszustand vor und nach, sondern auch *während* eines Untersuchungsabschnitts getroffen werden können. Diese Verfahren der Erfassung der subjektiven und objektiven Beanspruchung werden daher für weiterführende Untersuchungen empfohlen.

**Mithilfe der **HRV**-Analyse, der **BFS** und der **EZ-Skala** konnte gezeigt werden, dass das genutzte mobile **AR**-System nur eine solche Belastung für den Nutzer darstellt, die auch im längeren Einsatz eine physiologisch verträgliche Beanspruchung hervor ruft. Diese ist vergleichbar mit einer durch herkömmliche Arbeit hervorgerufenen Beanspruchung, was hier an einer Papierlisten-Kommissionierung nachgewiesen wurde. Bei der Verwendung eines optimierten Systems ist eine Verringerung der Beanspruchung möglich, sodass die Arbeit mit einem mobilen **AR**-System sogar eine Entlastung für den Nutzer darstellen kann. Hierbei stellt jedoch**



**nach Ergebnissen des Beschwerdefragebogens die Auslegung des Systems hinsichtlich einer möglichst geringen Belastung des visuellen Systems eine Herausforderung für zukünftige Systeme dar.**

Obwohl ein suboptimales mobiles AR-System genutzt wurde, konnte zudem nachgewiesen werden, dass Fehler sehr stark reduziert werden können. Fehler der Kategorie „Typfehler“ konnten durch den Einsatz des mobilen AR-Systems auf ein Viertel der Fehleranzahl der Papierliste reduziert werden. Beim Einsatz eines Systems, bei welchem die Einblendungen ohne Versatz und ohne Verzögerung am korrekten Ziel eingeblendet werden, können solche Typfehler vollständig vermieden werden.

Die hier ermittelten Ergebnisse sind nur begrenzt auf andere Probandengruppen, Anwendungsszenarien oder AR-Systeme übertragbar. Da viele der Probanden weder täglich mit der AR-Technologie noch in der Kommissionierung arbeiten, müssen zusätzlich Untersuchungen mit weiteren AR-Systemen und Anwendungsfachpersonal durchgeführt werden. Dabei sollten die Teilnehmer jeweils im Umgang mit der AR als auch mit der Kommissionierung geschult sein. Je nach Szenario werden unterschiedliche Anforderungen an die Werker hinsichtlich kognitiver und körperlicher Belastungen gestellt, wobei verschiedenartige AR-basierte Werkerassistenzsysteme eingesetzt werden können. Bei dem hier genutzten Referenzarbeitsplatz standen die körperlichen Belastungen im Vordergrund. Es müssen daher mittelfristig auch ähnlich gestaltete Untersuchungen in Anwendungsszenarien erfolgen, bei denen die kognitiven Belastungen gegenüber den körperlichen überwiegen, um das Potenzial der AR zur Beanspruchungsoptimierung auch in diesen Feldern nachzuweisen.

Erst wenn das eingesetzte AR-System optimal hinsichtlich des jeweiligen Arbeitsprozesses angepasst ist, werden seine Vorteile realisierbar. Folgende Verbesserungen sind demnach für die Optimierung des Gesamtsystems erforderlich:

- **verbesserte See-Through-Kalibrierung**
- verringerte Latenz von unter 100 ms
- ergonomisch optimierte HMD-Kopfträger
- gewichtsreduzierte HMD
- in Kleidung integrierte Hardwarekomponenten

Eine Verbesserung der Gerätetechnik (HMDs und -Kopfträger, Hardwarekomponenten) steht dabei nicht im Vordergrund der vorliegenden Arbeit, muss aber durch nachfolgende Arbeiten unbedingt aufgegriffen werden.

Die Latenz des Systems wird für weitere Untersuchungen durch den Einsatz leistungstärkerer Kleinstrechner und die Optimierung der verwendeten Algorithmen verringert. Zudem stellt der Einsatz von UDP anstelle des bisher verwendeten TCP eine Möglichkeit zur Verbesserung dar (vgl. Kapitel 4.3.5), die für zukünftige Untersuchungen realisiert werden soll. Dadurch können Latenzzeiten, die durch die Kommunikation der beteiligten Systemkomponenten entstehen, möglicherweise deutlich reduziert werden [HLDHR03].

Die Verbesserung der bisher eingesetzten See-Through-Kalibrierung ist nicht wie die Latenz allein durch den Einsatz leistungstärkerer Rechner oder anderer Systemkonzepte möglich. Für die See-Through-Kalibrierung ist es daher erforderlich, die bisher eingesetzten Methoden zu verbessern. Nur wenn ein



AR-Hinweis tatsächlich am korrekten Ziel eingeblendet wurde, war es den Anwendern am Referenzarbeitsplatz möglich, das richtige Entnahmefach zu identifizieren. Dabei ist bisher jedoch nicht klar, wie eine entsprechend hochwertige Kalibrierung ermöglicht wird und wie genau die Überlagerung am Zielobjekt sein muss. Daher ist es ein weiteres wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit, Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung der See-Through-Kalibrierung durchzuführen (siehe Kapitel 5).

---

# 5

## Verbesserung technischer Aspekte am Beispiel der See-Through-Kalibrierung

---

### 5.1 Einleitung

Im Abschnitt 4.5 wurde ein Versuch zur Analyse der Beanspruchung beim längerfristigen Einsatz der mobilen AR an einem Referenzarbeitsplatz beschrieben. Dabei wurde ein mobiles AR-System eingesetzt, welches ein OST-HMD als Ausgabemedium nutzte. Eine Rechteckeinblendung markierte das Ziel, an dem Teile kommissioniert werden sollten. Insbesondere bei der Analyse der Kommissionierfehler wurde deutlich, dass eine hohe Güte der See-Through-Kalibrierung entscheidend für den erfolgreichen Einsatz und die Akzeptanz solcher AR-Systeme ist. Obwohl die genutzte STK vergleichsweise einfach zu handhaben war, resultierte sie oftmals in einer ungenügenden Überlagerungsgenauigkeit. Sollen mobile AR-Systeme im industriellen Langzeiteinsatz genutzt werden, so ist eine STK nötig, die für Anwender handhabbar ist und gleichzeitig eine hohe Überlagerungsgenauigkeit ermöglicht, sodass das hohe Potenzial der mobilen AR-Technologie voll ausgeschöpft werden kann.

In den nachfolgenden Kapiteln werden daher die Ziele und mögliche Lösungsansätze für die Umsetzung eines möglichst genauen und einfach handhabbaren Verfahrens beschrieben. Das im zuvor genannten Versuch benutzte Verfahren für die Durchführung der STK wird erläutert, Schwachstellen werden analysiert und ein neues Durchführungsverfahren entwickelt. Abschließend wird ein weiterer Probandenversuch präsentiert, in dem die Durchführungsdauer und Überlagerungsqualität des neuen Verfahrens untersucht wurde.

---

### 5.2 Entwicklung verbesserter Verfahren

#### 5.2.1 Ziele

Aus der zuvor beschriebenen Untersuchung wurde deutlich, dass die Überlagerungsgenauigkeit eine wesentliche Rolle für die korrekte Ausführung von

Arbeitsschritten beim Einsatz eines Optical See Through Displays spielt. Um eine hohe Überlagerungsgenauigkeit zu erreichen, ist die Durchführung einer STK vor dem Einsatz solcher Systeme erforderlich. Für einen realen industriellen Einsatz spielt dabei jedoch nicht nur der Aspekt der Überlagerungsgenauigkeit sondern ebenfalls der dafür benötigten Durchführungsdauer eine Rolle.

Die STK stellt einen für OST-HMDs notwendigen, jedoch nicht-produktiven Arbeitsschritt beim Einsatz mobiler AR-Systeme dar. Daher müssen die Verfahren zur Durchführung der STK effizient sein, um eine gute Überlagerung in möglichst geringer Zeit zu erreichen. Je geringer die benötigte Zeit und je geringer der resultierende Überlagerungsfehler, desto effizienter ist das STK-Verfahren. Beim Vergleich verschiedener STK-Verfahren muss darauf geachtet werden, den Vergleich unter übereinstimmenden Bedingungen durchzuführen (z.B. gleiche Kalibrierentfernung, gleiche Passpunktanzahl).

Bei existierenden Verfahren stellt das nacheinander Überlagern vieler Punkte eine Herausforderung für die Anwender dar [GTN02]. Daher gilt es, bestehende Verfahren hinsichtlich ihrer Durchführungsdauer / Handhabbarkeit und der dabei erreichbaren Überlagerungsgenauigkeit zu verbessern. Zudem ist bisher unklar, in welcher Form Wertebereiche der Eingabeparameter für die Ermittlung der Projektionsmatrix  $P$  einen Einfluss auf die resultierende Überlagerungsgenauigkeit haben (vgl. Kapitel 3.3.2).

### 5.2.2 Analyse eines heutigen STK-Verfahrens

Tabelle 5.1: Anforderungen an die Kalibrierung

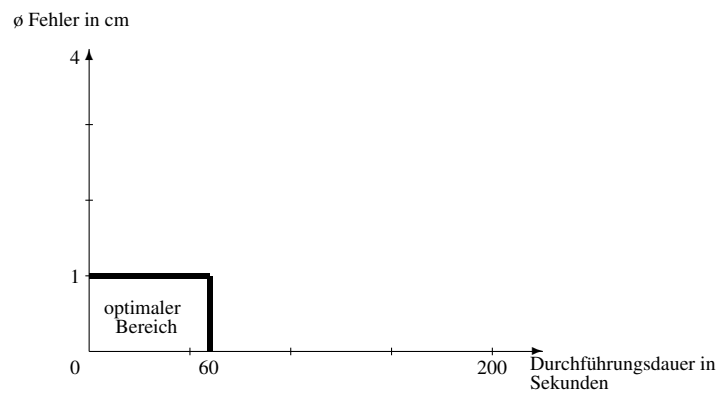
Handhabbarkeit	Überlagerungsgenauigkeit
<ul style="list-style-type: none"> <li>• schnelle, intuitive Durchführung durch Nutzer (max. 1 Minute Dauer bei erfahrener Nutzer)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weniger als 1 cm Abweichung bei Arbeitsentfernung</li> <li>• möglichst robust gegenüber ungenauer Durchführung</li> </ul>

Tabelle 5.1 stellt Anforderungen an die Kalibrierung dar. Diese wurden in Gesprächen mit AR-Experten für den Referenzarbeitsplatz festgelegt. Die Schranken von 1 cm Überlagerungsgenauigkeit und einer maximalen Durchführungsdauer von 60 Sekunden sollten nicht überschritten werden (Abbildung 5.1).

Recherchen zu den bisher verwendeten mathematischen Verfahren zeigen, dass diese robuster hinsichtlich von Ungenauigkeiten bei der Eingabe gemacht werden können, beispielsweise durch die Erhöhung der Anzahl der verwendeten Passpunkte.

Für das bisher eingesetzte SPAAM-Verfahren [TGN02] kann aus Analysen von Tang et al. geschlossen werden [TZO03], dass die Durchführungsdauer bei etwa 100 Sekunden liegt, wobei in einer 70 cm-Arbeitsentfernung Fehler von 2,5 cm bis 6 cm entstehen. Dies zeigt, dass solche Verfahren zur Durchführung der Kalibrierung bisher für den Einsatz am Referenzarbeitsplatz ungeeignet sind und dringend hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit und Handhabbarkeit verbessert werden müssen.

Abbildung 5.1: Markierung des optimalen Bereichs für Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der STK

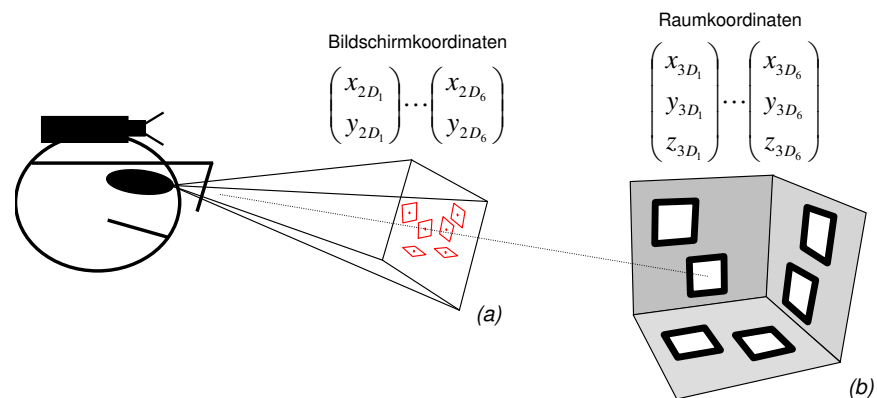


Quelle: Eigener Entwurf

### 5.2.3 Verkürzung der Durchführungsdauer

Mögliche Verbesserungen bisheriger Verfahren bestehen darin, einerseits die Anzahl der einzelnen Korrespondenzaufnahmen zu verringern, andererseits dem Nutzer bestimmte Positionen vorzugeben, damit keine ungeeigneten Eingaben entstehen.

Abbildung 5.2: Schema des vereinfachten Kalibriervorganges



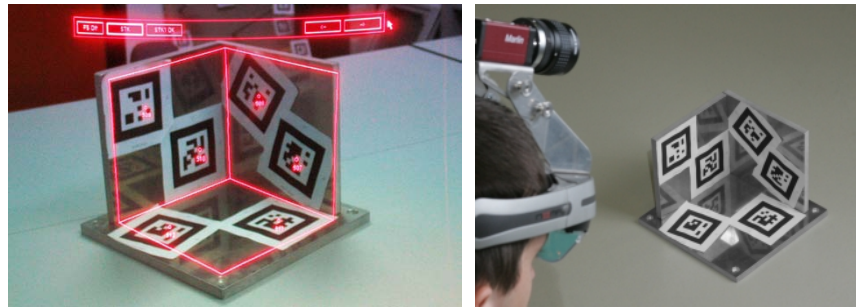
Quelle: Eigener Entwurf

Diese beiden Verbesserungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Form einer neuen Ein-Schritt-Kalibrierung (**ESK**) realisiert. Bei diesem Verfahren werden sechs 2D-3D-Passpunkte in einem einzigen Durchlauf ermittelt. Für die schnellere Durchführung wurde ein Kalibrierkörper erstellt ( $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ), welcher sechs unterschiedliche Marker trägt (Abbildung 5.2b). Diese Marker werden zeitgleich durch das Trackingsystem erfasst und liefern somit kontinuierlich sechs 3D-Markerpositionen, welche den kalibrierten Raum (das *Kalibriervolumen*) definieren.

Dem Benutzer wird ein statisches 2D-Bild eingeblendet (Abbildungen 5.2a und 5.3a), durch welches fest vorgegeben wird, aus welcher Position und mit welcher Orientierung dieser durch das Display den Kalibrierkörper betrachten muss (Abbildung 5.3b). Dieses 2D-Bild muss je nach verwendetem **HMD** einmal im Voraus manuell erstellt werden. Daher ist die 2D-Position aller Marker im Bild von vornherein bekannt.

Um dem Anwender das Auffinden der exakten Pose zu vereinfachen, werden Geometrieinformationen des Kalibrierkörpers (Kanten) mit angezeigt. Hat der Benutzer das 2D-Bild mit dem realen Kalibrierkörper in Übereinstimmung gebracht, bestätigt er dies per Knopfdruck, die 3D-Trackinginformationen werden ausgelesen und somit die Projektionsmatrix  $P$  erstellt.

Abbildung 5.3: Durchführung des vereinfachten Kalibriervorgangs



(a) Durchsicht durch das HMD bei Überlagerung

(b) Nutzer positioniert sich mit angelegtem HMD vor Kalibriervorgang

Fotos: Jens Grubert / Fraunhofer IFF

Dieses Verfahren wurde im unter Kapitel 4.5 beschriebenen Versuch erstmalig eingesetzt. Dabei wurde deutlich, dass das Verfahren zwar hinsichtlich der Durchführungsdauer geeignet war, da nur ca. 45 Sekunden je Durchführung benötigt wurden. Jedoch zeigte sich ebenfalls, dass das Verfahren hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit großes Optimierungspotenzial bietet. Auf 70 cm Entfernung entstanden mit dem eingesetzten Kalibriervorgang Überlagerungsfehler bis zu 5 cm. Ein wesentliches Problem dieser Kalibrierung besteht jedoch darin, dass bei der Durchführung die aufgenommenen 3D-Koordinaten auf ein sehr kleines Kalibriervolumen und die 2D-Parameter auf das Zentrum des Displays beschränkt sind. Dadurch entstehen Ungenauigkeiten, wenn eine Überlagerung außerhalb des Kalibriervolumens und am Rand des Displays dargestellt wird. Daher wurden nachfolgend Analysen zur Überlagerungsgenauigkeit durchgeführt, um das Verfahren weiter zu verbessern.

#### 5.2.4 Analysen zur Überlagerungsgenauigkeit

##### Anforderungen an die Überlagerungsgenauigkeit und deren Beeinflussung

Um bei der Bearbeitung eines AR-gestützten Arbeitsvorganges Fehler zu vermeiden, ist es beim Einsatz der kongruenten Überlagerung wichtig, dass die Einblendung korrekt mit einem realen Objekt registriert ist. Werden Informationen an der falschen Stelle eingeblendet, besteht die Gefahr, dass die Aufgabe vom Anwender falsch interpretiert wird. Geringe Abweichungen sind hier jedoch möglich, wobei der Wert der akzeptablen Abweichungen situationsabhängig ist [RM03] und zudem durch zusätzliche Identifikationsmerkmale (z.B. Form, Farbe) kompensiert werden können [Kas08]). Dabei muss der Anwender neben dem Einblendungsort zusätzlich die weiteren Identifikationsmerkmale beachten, wodurch die kognitiven Anforderungen beim AR-Einsatz steigen. In der vorliegenden Arbeit wird daher auf den Einsatz dieser zusätzlichen Identifikationsmerkmale verzichtet.

Die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit im OST-HMD wird bei der Durchführung der Kalibrierung durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Parameter und Kalibrierung der Trackingsensorik
- aktuelle Trackingqualität
- das mathematische Verfahren zur Kalibrierung
- Anzahl und Wertebereich der Eingabeparameter

Die Technik der Trackingsensorik ist bereits vergleichsweise ausgereift. Beispielsweise kann mit einer sorgfältig ausgeführten Kamerakalibrierung beim

Einsatz einer Kamera mit hoher Auflösung sehr genau getrackt werden, sodass der Trackingfehler unter 1 mm gehalten werden kann [Pen09]. Wenn zudem bei der Durchführung der STK die Umweltfaktoren stabil gehalten (homogene Lichtverhältnisse) und qualitativ hochwertige Bilder für das Tracking genutzt werden (wenig Rauschen), wird die resultierende Trackingqualität hoch sein. Durch den Einsatz optimierter mathematischer Verfahren wie etwa der Singulärwertzerlegung kombiniert mit der Normierung nach Hartley-Zisserman [HZ04] wird die Qualität des Kalibrierergebnisses zudem positiv beeinflusst, d.h. der Kalibrierfehler weiter verringert [Pen09].

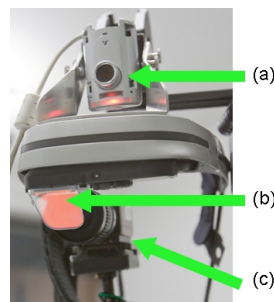
Die Konditionierung der Eingabeparameter ist jedoch bisher für den Bereich der See-Through-Kalibrierung weitgehend offen. Es gibt zwar Empfehlungen aus dem Feld der Kamerakalibrierung, jedoch ist unklar, in wie weit diese für die STK gelten. Daher werden nachfolgend Untersuchungen zur optimalen Beschaffenheit der Eingabeparameter beschrieben.

### Voruntersuchung zur Anzahl und Anordnung von Passpunkten

Das zuvor beschriebene Verfahren zur vereinfachten Durchführung der STK nutzt einen Kalibrierkörper, an dem sechs 3D-Raumpunkte ermittelt werden können, die mit sechs nahe am Zentrum des virtuellen Bildschirms angeordneten 2D-Punkten in Deckung gebracht werden müssen. Die Anordnung der Passpunkte resultierte in akzeptablen Überlagerungsgenauigkeiten beim Arbeiten in der eingestellten Kalibrierentfernung sowie in der Displaymitte, führte jedoch zu Abweichungen von mehreren Zentimetern in anderen Entfernungen und bei Einblendungen am Rand des Displays (bei 70cm Entfernung am Displayrand ca. 5 cm Versatz).

Bisher ist weitgehend unklar, welche Anzahl von Passpunkten mit welcher Anordnung im Raum zu guten Kalibrierergebnissen führt. Da die See-Through-Kalibrierung mit dem Bereich der Kamerakalibrierung verglichen werden kann (vgl. Kapitel 2.2.4), wurden Empfehlungen aus diesem Bereich recherchiert. Hier beschreiben Hartley und Zisserman die Verwendung von 28 Passpunkten sowie deren Anordnung in allgemeiner Lage [HZ04]. Es ist jedoch unklar, inwieweit dies für die See-Through-Kalibrierung übertragbar ist. Weiterhin sind keine Aussagen über eine günstige Passpunktanordnung im Raum sowie auf dem 2D-Display bekannt.

Abbildung 5.4: Trackingkamera (a), OST-HMD (b) und Augersatzkamera (c)

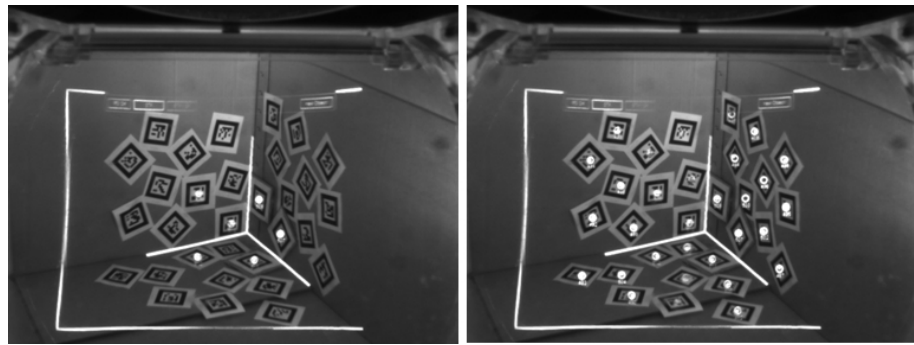


Quelle: Eigene Aufnahme

Das zuvor beschriebene neue 1-Schritt Durchführungsverfahren (Abschnitt 5.2.3) sollte daher hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit weiter untersucht werden. Um die resultierenden Kalibrierergebnisse objektiv bewerten zu können, wurde ein im Raum frei beweglicher Versuchsaufbau entwickelt [GTM08], bei dem eine Kamera das menschliche Auge simuliert (Abbildung 5.4) und durch ein Microvision Nomad ND2100 HMD blickt. Dieser

Versuchsaufbau wurde für die weiteren Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zur [STK](#) genutzt.

Abbildung 5.5: Überlagerung von sechs bzw. 30 2D-Punkten auf den korrespondierenden 3D-Raumpunkten



Quelle: Eigene Aufnahmen

Für eine erste Analyse hinsichtlich der erreichbaren Überlagerungsgenauigkeit wurde ein Kalibrierkörper erstellt, an dem 30 Marker zur Ermittlung von 3D-Raumpunkten angebracht sind. Für eine Einschätzung werden unter homogenen Lichtbedingungen auf dem 2D-Display des [HMDs](#) sechs bzw. 30 2D-Positionen eingeblendet, die jeweils mit ihren korrespondierenden 3D-Raumpunkten durch Verschiebung der 2D-Punkte in Überlagerung gebracht werden (Abbildung 5.5). Die Anordnung der Punkte ist so gewählt, dass beim Einsatz von 30 Punkten ein Großteil des Displaybereiches abgedeckt wird, wobei die Trackingkamera stets alle Marker erfassen kann (Abstand ca. 1,60 m). Für den Einsatz von sechs Markern ist eine Anordnung gewählt, bei der die zu überlagernden Punkte ähnlich zum zuvor beschriebenen ersten Kalibrierkörper nahe am Displayzentrum liegen.

Die Ermittlung der Überlagerungsgenauigkeit nach erfolgter [STK](#) gemäß Abschnitt 2.2.4 wird mithilfe mehrerer auf einer Ebene angebrachter Marker (Kantenlänge 60 mm) durchgeführt. Die ermittelte 3D-Raumposition eines jeden Markers wird gemäß Gleichung 2.1 mit der Kalibriermatrix multipliziert und so die 2D-Koordinate zur Einblendung der Markermittle im Display bestimmt. Die vier Eckpunkte des Markers werden durch Koordinatentransformation des 3D-Markermittelpunktes und Verschiebung um die halbe Kantenlänge des Markers ( $\pm 30$  mm in x- bzw. y-Richtung) ebenfalls mit der Kalibriermatrix multipliziert und so die Eckpunkte eines Rechtecks ermittelt. Schließlich werden die Eckpunkte durch Linien verbunden und repräsentieren somit die Markerkanten im 2D-Bild.

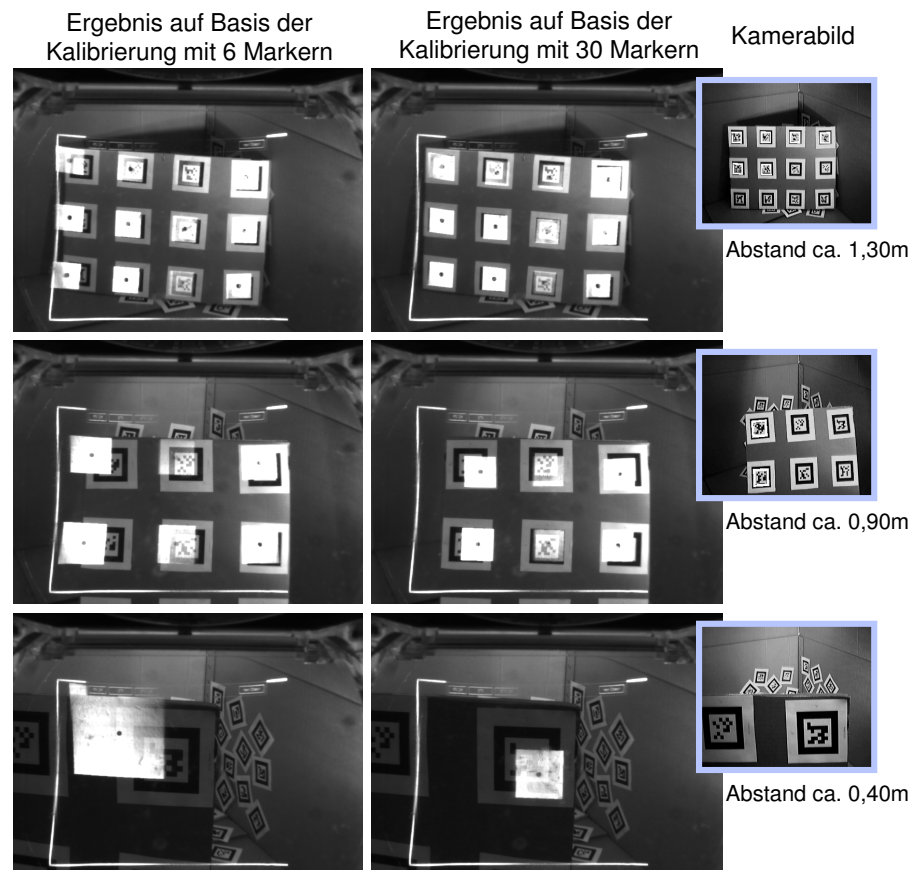
Abbildung 5.6 zeigt<sup>15</sup>, dass sowohl die Kalibrierung auf Basis der Anordnung mit sechs (links) als auch mit 30 Punktkorrespondenzen (Mitte) ungenügende Ergebnisse hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit erzeugt (Sicht der Trackingkamera in Abbildung 5.6 rechts). Jedoch bestehen für die Anordnung mit 30 Markern Vorteile in Entfernungen, die nahe am 3D-Schwerpunkt, das heißt in der mittleren Raumposition aller 3D-Raumpunkte des Kalibrierkörpers, liegen. Beide Markieranordnungen führen zu einer schlechten Überlagerungsgenauigkeit am Randbereich des Displays.

Außerhalb des Kalibriervolumens nimmt die Überlagerungsgenauigkeit ab, da in diesem Fall Werte außerhalb der Eingabeparameter extrapoliert werden. Daher wird angenommen, dass für die 3D-Punkte des Kalibrierkörpers die Verteilung im Raum eine wesentliche Rolle für das Erreichen einer hohen Überlage-

<sup>15</sup> Versatz der Einblendung (weißes, helles Quadrat) zum Marker



Abbildung 5.6: Überlagerungsergebnis auf Basis von sechs (links) und 30 (rechts) Punktkorrespondenzen



Quelle: Eigene Aufnahmen

rungsgenauigkeit spielt. Es ist jedoch weiterhin nicht klar, welche Anordnungen im Raum und im HMD eine hohe Überlagerungsgenauigkeit ermöglichen.

### Untersuchungen zur Markerverteilung im Raum

Das Ziel der folgenden Untersuchung ist die Ermittlung einer optimalen Anordnung der 2D-3D-Punktkorrespondenzen, sodass daraus eine möglichst hohe Überlagerungsgenauigkeit in unterschiedlichen Arbeitsabständen resultiert. Diese Untersuchung stellt somit eine der wesentlichen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zur Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit dar.

Tang et al. zeigten bereits, dass durch eine räumliche Verteilung der 3D-Punkte die Überlagerungsgenauigkeit erhöht werden kann [TZO03]. Daher wurde der bestehende Versuchsaufbau erweitert, indem am Kalibrierkörper zusätzliche, stärker im Raum verteilte Marker angebracht sind<sup>16</sup>.

Abbildung 5.7 zeigt den hierfür eingesetzten Versuchsaufbau mit 39 Markern. Diese sind so positioniert, dass im Vergleich zur zuvor beschriebenen Analyse sowohl Untersuchungen mit höherer als auch geringerer räumlicher Verteilung durchgeführt werden können. Für die Untersuchung wurden verschiedene Markeranordnungen gewählt. Nachfolgend werden die Ergebnisse von vier Anordnungen beschrieben:

<sup>16</sup> Durch die stärkere räumliche Verteilung der Marker im Raum ist bei gleichbleibender Markergröße eine Erhöhung (geringerer Abstand der Marker von der Trackingkamera) oder Verringerung (größerer Abstand der Marker von der Trackingkamera) der Trackinggenauigkeit möglich. Dies kann durch die Anpassung der Markergröße verhindert werden, indem im Vordergrund kleinere Marker als im Hintergrund eingesetzt werden. Im hier beschriebenen Versuch ist dies noch nicht berücksichtigt.

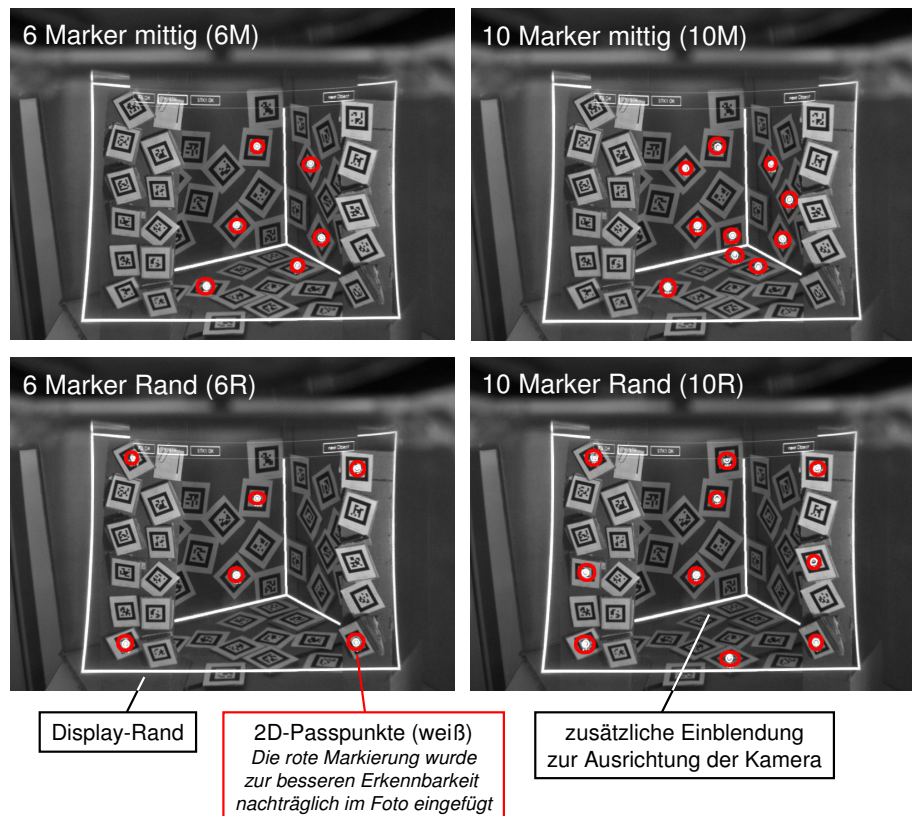
Abbildung 5.7: Initialer Kalibrierkörper mit 39 im Raum verteilten Markern



Quelle: Eigene Aufnahme

- 6 Marker mittig angeordnet (**6M**), Markerabstände zur Trackingkamera: 150-163 cm
- 10 Marker mittig angeordnet (**10M**), Markerabstände zur Trackingkamera: 150-171 cm
- 6 Marker sowohl am Rand als auch mittig angeordnet (**6R**), Markerabstände zur Trackingkamera: 79-163 cm
- 10 Marker sowohl am Rand als auch mittig angeordnet (**10R**), Markerabstände zur Trackingkamera: 79-163 cm

Abbildung 5.8: Unterschiedliche Anordnungen von 2D- und 3D-Passpunkten (6M, 10M, 6R, 10R) zur Durchführung der See-Through-Kalibrierung

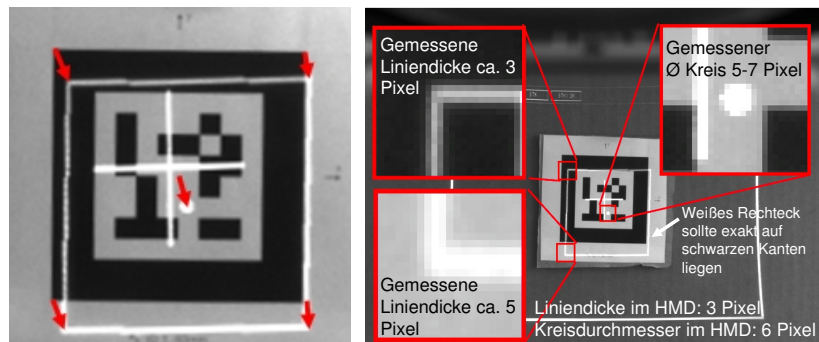


Quelle: Eigene Aufnahmen

Abbildung 5.8 zeigt diese Anordnungen. Die Konfiguration **6M** entspricht dabei etwa der Anordnung, die im zuvor beschriebenen 1-Schritt Durchführungsverfahren (Kapitel 5.2.3) genutzt wurde.

Für jede der Anordnungen werden unter homogenen Lichtbedingungen Markerpositionen durch das Tracking ermittelt und mittels Direkter Linearer Transformation, Singulärwertzerlegung und Normierung (siehe Kapitel 2.2.4) die Projektionsmatrix erstellt. Nach abgeschlossener Kalibrierung werden jeweils 8 Testaufnahmen mit 5 Testmarkern in Abständen von 30 cm bis 160 cm aufgenommen, wobei die Testmarker in der Displaymitte und an den Randbereichen angeordnet sind. Schließlich werden die Abstände zwischen den projizierten virtuellen und den realen Markern („Versatz“) im Markermittelpunkt und an den Markerecken im von der Augersatzkamera erfassten HMD-Bild ausgemessen (Abbildung 5.9a).

Abbildung 5.9: Bestimmung des Versatzes durch Analyse des Überlagerungsbildes der Augersatzkamera



(a) Beispielversatz an einem einzelnen Marker

(b) Messgenauigkeit eingeschränkt durch unterschiedliche Helligkeit der Darstellung je Hintergrund

Quelle: Eigene Aufnahmen

Die Messgenauigkeit wird dabei durch die Auflösung und Entfernung der Augersatzkamera<sup>17</sup>, die „Breite“ der eingeblendeten Linien<sup>18</sup> sowie die Ausrichtung der Marker zur Bildebene der Augersatzkamera<sup>19</sup> beeinflusst. Daher sind Messungenauigkeiten von bis zu 3 Pixel in HMD Koordinaten möglich<sup>20</sup>. Abbildung 5.9b verdeutlicht einige der Ungenauigkeiten. Daneben können trotz sorgfältiger Kalibrierung der Trackingkamera Messungenauigkeiten beim Ermitteln der 3D-Raumpositionen<sup>21</sup> entstehen.

Bezüglich der Anordnungen werden verschiedene Hypothesen aufgestellt. Zunächst wird angenommen, dass mit erhöhter Passpunktanzahl das Kalibrierergebnis genauer ist.

**V3\_H1:** Je höher die Anzahl der verwendeten Passpunkte, desto höher ist die resultierende Überlagerungsgenauigkeit.

Bei der Voruntersuchung wurde ein Kalibrierkörper beschrieben, bei dem die 3D-Raumpunkte relativ nah beieinander liegen. Bei der Auswertung wurde

<sup>17</sup> AVT Marlin F-080B, 1 Pixel in Augkamerakordinaten entsprach ca. 1,4 Pixel im HMD

<sup>18</sup> Rand: 3 Pixel bis 5 Pixel, Mittelpunkt: 6 Pixel bis 8 Pixel, je nach Displayhelligkeit; siehe Abbildung 5.9b

<sup>19</sup> bei Aufnahmeabstand von 30 cm: 1 Pixel entspricht ca. 0,03 cm, bei 160 cm: 1 Pixel entspricht ca. 0,15 cm

<sup>20</sup> 0,09 cm bei Aufnahmeabstand von 160 cm, 0,45 cm bei Aufnahmeabstand von 30 cm

<sup>21</sup> Die Marker nahmen durchschnittlich ca. 2500 Pixel im Kamerabild ein. Der durchschnittliche Trackingfehler betrug daher ca. 12 mm (95% in Z-Richtung), vgl. [Pen09].

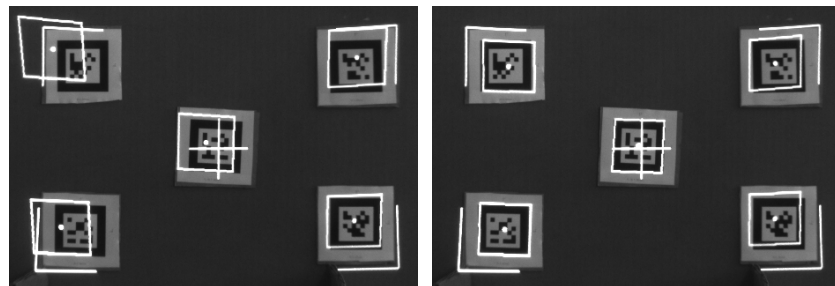
deutlich, dass die Kalibrierung gerade dann versagt, wenn außerhalb dieses Kalibriervolumens gearbeitet wird. Weiterhin ist ersichtlich, dass dabei in den Randbereichen des HMD ein großer Kalibrierfehler entsteht. Dies kann möglicherweise durch eine bessere Anordnung der Passpunkte im Display und im Raum kompensiert werden. Daher wird in einer weiteren Hypothese formuliert:

**V3\_H2:** Passpunktanordnungen, die den gesamten 2D-Displaybereich abdecken und dabei stark in der Tiefe verteilte 3D-Passpunkte verwenden, führen zu einer höheren Überlagerungsgenauigkeit als Passpunktanordnungen, die nur einen geringen Displaybereich bei geringer Tiefenverteilung abdecken.

Aus den vorherigen Hypothesen ergibt sich eine weitere Vermutung, die in diesem Zusammenhang untersucht werden soll:

**V3\_H3:** Die Überlagerungsgenauigkeit ist im 3D-Schwerpunkt aller 3D-Raumpositionen der Kalibriermarker am höchsten.

Abbildung 5.10: Beispiele für Überlagerungsfehler in fünf Bildschirmbereichen nach durchgeführter Kalibrierung



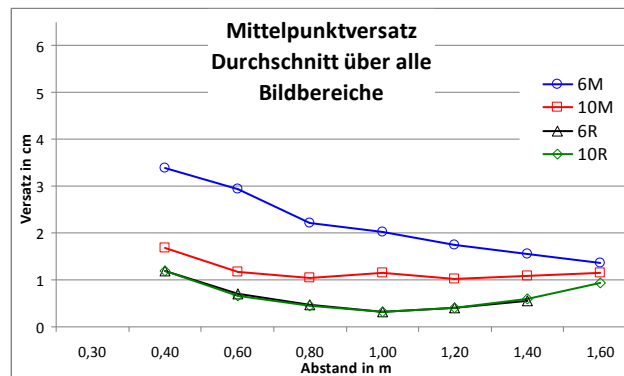
(a) Beispiel: 6M bei 1,2m

(b) Beispiel: 10R bei 1,2m

Quelle: Eigene Aufnahmen

Abbildung 5.10 zeigt zwei Aufnahmen bei 1,20 m Abstand. Bei einem größeren Aufnahmeabstand rücken die Marker weiter ins Bildzentrum. Das im Zentrum der Bilder sichtbare Kreuz wurde stets auf den mittleren Marker ausgerichtet. Der Versatz wird bestimmt, wie in der zuvor beschriebenen Voruntersuchung zur Anzahl und Anordnung von Passpunkten, indem der Abstand der projizierten Markermittelpunkte zum realen Markermittelpunkt im Kamerabild ermittelt wird.

Abbildung 5.11: Durchschnittlicher Mittelpunktversatz in allen Bildschirmbereichen



Quelle: Eigener Entwurf

Die Abbildung 5.11 stellt den durchschnittlich ermittelten Versatz bei unterschiedlichen Abständen (0,3 m bis 1,6 m) dar. Der Durchschnitt wurde aus

dem Mittel der Abweichungen im Bildschirmzentrum, in den oberen, unteren sowie linken und rechten Bildbereichen (vgl. Abbildung 5.10) ermittelt.

In Abbildung 5.11 werden Anordnungen mit 6 und 10 Markern verglichen. Hierbei wird deutlich, dass die Erhöhung der Markeranzahl zu einem besseren Ergebnis führen kann. Der Vergleich der Werte von 6M und 10M zeigt, dass in dieser Anordnung 10 Passpunkte in einem geringeren Fehler resultieren als beim Einsatz von 6 Passpunkten (2,0 cm bei 6M gegenüber 1,1 cm bei 10M, jeweils in 1 m Aufnahmeabstand). Vergleicht man jedoch die Werte von 6R mit denen von 10M, so ist 6R deutlich besser als 10M (1,1 cm bei 10M gegenüber 0,4 cm bei 6R, jeweils in 1 m Aufnahmeabstand), obwohl weniger Passpunkte genutzt wurden. Die weitere Erhöhung der Anzahl der Passpunkte hatte nur einen geringen Einfluss auf die Überlagerungsgenauigkeit, zusätzliche Untersuchungen mit 23 und 39 Markern am gleichen Kalibrierkörper zeigen keine weitere Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit. Somit wurde Hypothese **V3\_H1** widerlegt.

Es ist erkennbar, dass die Formationen 6R und 10R durchschnittlich den geringsten Versatz von überwiegend unter einem Zentimeter aufweisen. Diese Formationen decken durch die stärkere Tiefen- und Flächenverteilung ein größeres Kalibriervolumen ab als die Formationen 6M und 10M. Gleichzeitig sind die Formationen 6R und 10R stärker über den 2D-Displaybereich verteilt. Daher konnte die Hypothese **V3\_H2** bestätigt werden.

Für die Überprüfung der Überlagerungsgenauigkeit im 3D-Schwerpunkt der Kalibrieranordnungen wurde jeweils ein einzelner Marker im 3D-Schwerpunkt der verwendeten 3D-Passpunkte platziert und die Abweichungen für diesen Punkt für alle Kalibrierungen ermittelt.

Die Abbildungen 5.12a bis 5.12d zeigen den Mittelpunktabstand aller Konfigurationen im 3D-Schwerpunkt (Centroid) der 3D-Passpunkte jeweils einer einzelnen Markerkonfiguration. Daraus wird deutlich, dass das Kalibrierergebnis im 3D-Schwerpunkt jeder Konfiguration am genauesten ist und somit **V3\_H3** zutrifft. Dies wird auch in Abbildung 5.12e deutlich, bei der die 3D-Schwerpunkte von 6M, 10M und 6R, 10R markiert sind.

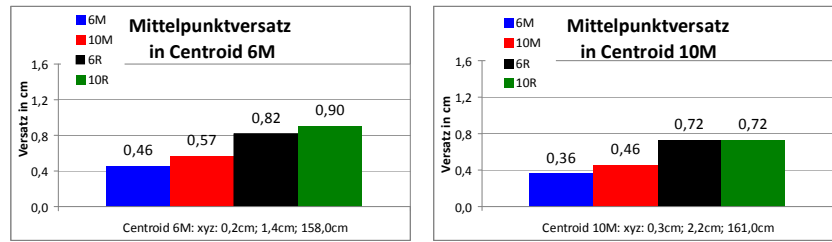
Für das Erstellen eines geeigneten verbesserten Kalibrierkörpers sind somit folgende Randbedingungen zu beachten:

- Unterschiedliche Abstände der 3D-Passpunkte in Z-Richtung (d.h. weg von der Trackingkamera)
- Gleichmäßige Verteilung der 2D-Punkte über das gesamte **HMD**
- Lage des 3D-Schwerpunktes in der üblichen Arbeitsentfernung
- Lage des auf das 2D-Display projizierten 3D-Schwerpunktes in der Displaymitte
- Nutzen einer möglichst hohen Genauigkeit beim Markertracking durch möglichst große Marker und eine Trackingkamera mit möglichst hoher Auflösung

Durch die Untersuchung konnte erkannt werden, dass die Minimalanzahl von sechs 2D-3D-Passpunkten ausreichend sein kann, um in Entfernungen zwischen 40 cm bis 1,60 m einen Überlagerungsfehler von weniger als 1 cm zu

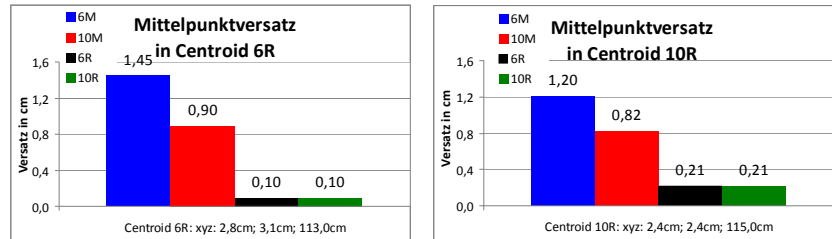


Abbildung 5.12: Mittelpunktversatz in den 3D-Schwerpunkten der Kalibrieranordnungen



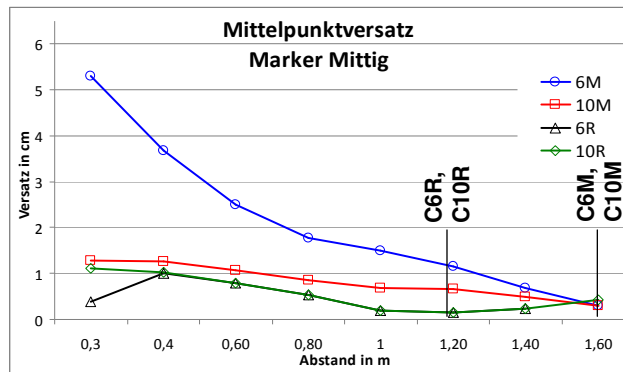
(a) Fehler im 3D-Schwerpunkt von 6M

(b) Fehler im 3D-Schwerpunkt von 10M



(c) Fehler im 3D-Schwerpunkt von 6R

(d) Fehler im 3D-Schwerpunkt von 10R



(e) Versatz in der Bildschirmmitte mit Markierung der 3D-Schwerpunktentfernung

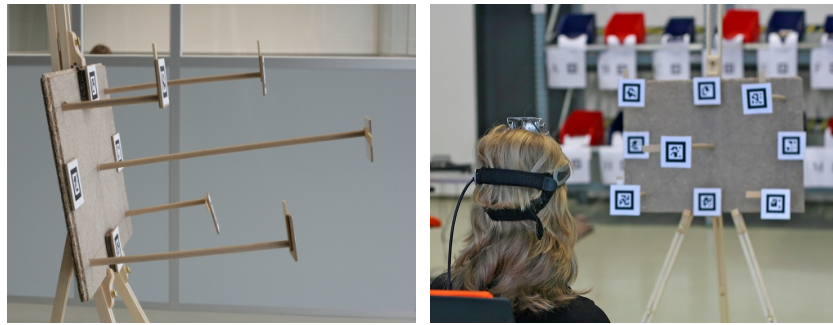
Quelle: Eigener Entwurf

erzielen. Durch die Erhöhung der Passpunktanzahl konnte die Überlagerungsgenauigkeit nicht weiter wesentlich gesteigert werden. Dennoch wird nachfolgend der Einsatz von neun Passpunkten empfohlen:

- Ecken (oben links, oben rechts, unten rechts, unten links)
- die Displaymitte
- die vier „Seitenhalbierenden“ des Randbereichs des 2D-Displays (Mitte links, Mitte oben, Mitte rechts, Mitte unten)

Dies ermöglicht einerseits eine gleichmäßige Abdeckung des 2D-Bildbereiches und andererseits eine Erfassung des Displayrandes, an dem Verzerrungen besonders stark auftreten können. Aufgrund der zuvor genannten Untersuchungen zur Anzahl und Verteilung der 2D-3D-Passpunkte wurde ein verbesserter Kalibrierkörper entworfen (Abbildung 5.13), der es ermöglicht, den gesamten Displaybereich abzudecken, wobei neun Passpunkte in unterschiedlichen Entfernungen angeordnet sind. Jeder der in unterschiedlicher Tiefe angeordneten 3D-Punkte wird durch einen quadratischen Marker mit 60 mm Kantenlänge repräsentiert.

Abbildung 5.13: Verbesserter Kalibrierkörper mit 9 räumlich verteilten 3D-Punkten



(a) Prototypischer verbesserter ESK-Kalibrierkörper

(b) Anwenderin führt Kalibrierung mit verbessertem ESK-Kalibrierkörper durch

Quelle: Eigene Aufnahmen

## 5.3 Probandenversuch zur Analyse der Überlagerungsgenauigkeit und Durchführungsdauer

### 5.3.1 Einleitung

Beim in Kapitel 4.5 beschriebenen Versuch zur Beanspruchung im Langzeiteinsatz wurde für die STK das hier entwickelte Verfahren der Ein-Schritt-Kalibrierung (ESK) genutzt (Kapitel 5.2.3). Dieses ist mit etwa 45 s Durchführungsdauer schnell durchführbar, resultiert jedoch im Displayrandbereich in Überlagerungsfehlern bis zu 5 cm. Dies wurde in der Auswertung des Probandenversuches als eine Ursache für Fehlgriffe (Typfehler) und somit für eine fehlerhafte Auftragsbearbeitung identifiziert. Für zukünftige Untersuchungen ist es wichtig, einerseits die Überlagerungsgenauigkeit deutlich zu verbessern und andererseits die Durchführungsdauer der STK weiterhin möglichst kurz zu halten. Die Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit ermöglicht die Reduzierung von Fehlern durch korrekt überlagerte Einblendungen und kann daher den Suchaufwand und die damit verbundene Belastung der Probanden verringern.

Die Untersuchungen zur Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit in Kapitel 5.2.4 wurden an einem Laborversuchsaufbau durchgeführt, bei dem das Display, die Trackingkamera sowie die Augersatzkamera stationär aufgebaut waren. Dadurch wurden Erkenntnisse über sinnvolle Anordnungen der Passpunkte gewonnen und ein verbesserter Kalibrierkörper erstellt. Eine realitätsnahe Untersuchung mit Anwendern steht bisher jedoch aus. Diese Untersuchung muss zur Beantwortung der folgenden Frage durchgeführt werden:

Sollten für einen realen Einsatz bei möglichst hoher Überlagerungsgenauigkeit und geringer Durchführungsdauer bei der STK alle Passpunkte gleichzeitig oder einzeln nacheinander aufgenommen werden?

In der nachfolgend beschriebenen Nutzerstudie wird die erreichbare Überlagerungsgenauigkeit beider Verfahren miteinander verglichen und in Bezug zur benötigten Durchführungsdauer gesetzt, um diese Frage zu beantworten.

### 5.3.2 Versuchsplanung

Für die Nutzerstudie wurde das im Kapitel 4.5 verwendete AR-System dahingehend erweitert, dass Passpunkte sowohl gleichzeitig als auch nacheinander

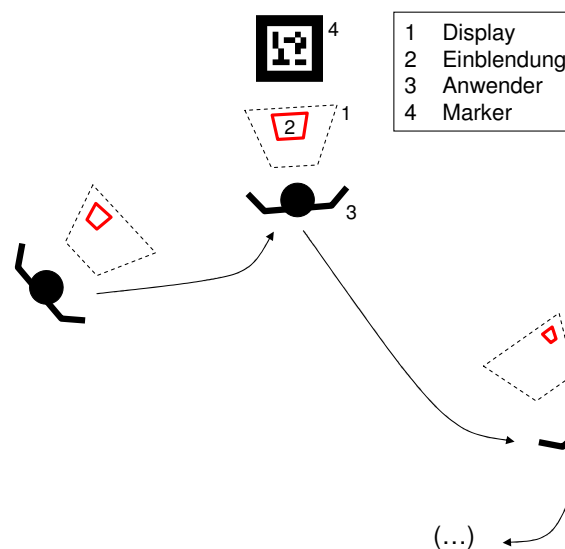


aufgenommen werden können, wobei die jeweilige Durchführungsdauer automatisch protokolliert wird. Die beiden hier verwendeten und verglichen Verfahren sind die Mehr-Schritt-Kalibrierung (**MSK**) und die **ESK**.

### Mehr-Schritt-Kalibrierung (MSK)

Beim von Tang et al. vorgestellten Verfahren „Tiefen-SPAAM“ [TZO03] überlagern die Anwender nacheinander mehrere 2D-Einblendungen mit einem 3D-Passpunkt. Im Display werden nacheinander einzelne feste Punkte eingeblendet, die schrittweise mit einem einzelnen räumlich erfassten Objekt überlagert werden. Wie in Kapitel 5.2.4 erkannt wurde, führt es zu genaueren Ergebnissen als das ursprüngliche SPAAM-Verfahren nach Tuceryan et al. ([TGN02]), wenn die Entfernung der Anwender zum 3D-Passpunkt mehrmals verändert wird. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe Aufwand der Durchführung, der durch die mehrmalige Neupositionierung des Nutzers entsteht [TZO03].

Abbildung 5.14: Schema der Mehr-Schritt-Kalibrierung



Quelle: Eigener Entwurf

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte **MSK** basiert auf dem Verfahren des „Tiefen-SPAAM“ und erweitert es dadurch, dass den Anwendern vorgegeben wird, aus welcher Entfernung und in welcher Lage die 2D-Einblendung das 3D-Objekt überlagern soll (Abbildung 5.14). Für die **MSK** ist ein einzelner Marker an einer festen Position im Raum fixiert. Den Probanden werden nacheinander neun Einblendungen im **HMD** präsentiert, welche die Kanten des Markers, betrachtet aus einer vorgegebenen Position, repräsentieren. Dadurch sind die Probanden aufgefordert, feste räumliche Positionen einzunehmen, sodass einerseits die 3D-Eingabewerte der einzelnen 3D-Passpunkte wie gewünscht inhomogen sind und andererseits alle Probanden ähnliche Werte ins System eingeben.

Die Entfernung zwischen Passpunkten und Trackingkamera beträgt ca. 87 cm bis 197 cm.

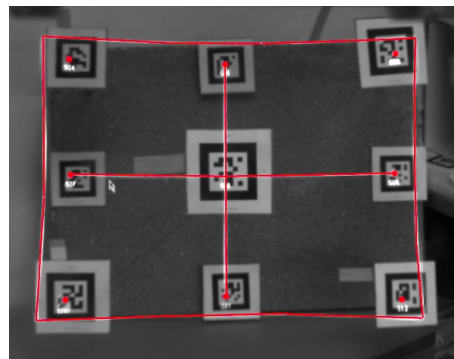
### Ein-Schritt-Kalibrierung (ESK)

Die **ESK** ist die konsequente Weiterentwicklung des **MSK**-Verfahrens und nutzt den verbesserten Kalibrierkörper (vgl. Kapitel 5.2.4) mit neun räumlich verteilten 3D-Passpunkten, die mit neun gleichmäßig im **HMD** verteilten 2D-Passpunkten in Deckung gebracht werden müssen. Dies erlaubt es den Nut-

zern, das AR-System in einem einzelnen Schritt zu kalibrieren. Die Genauigkeit dieses Kalibrierkörpers spielt für die STK keine Rolle, da die 2D-Einblendung im HMD in einem offline-Schritt vor der eigentlichen Kalibrierung erstellt wird. Bei Veränderungen am Kalibrierkörper oder beim Einsatz eines anderen HMDs muss die 2D-Einblendung angepasst werden.

In den zuvor beschriebenen Analysen zur Überlagerungsgenauigkeit waren HMD und Augersatzkamera auf einem Stativ fest vor dem Kalibrierkörper aufgestellt. Die korrekte Überlagerungsposition von 2D- und 3D-Passpunkten konnte mithilfe der Augersatzkamera und gegebenenfalls durch Verschiebung der 2D Punkte im 2D-Bild erreicht werden. Wenn hingegen ein realer Anwender die Kalibrierung mit dem aufgesetzten HMD durchführt, so benötigt er eine Hilfestellung beim Auffinden der korrekten Überlagerungsposition.

Abbildung 5.15: Einblendung zur Kalibrierung mittels ESK: 2D-Passpunkte mit Hilfslinien



Quelle: Eigene Aufnahme

Daher wird den Probanden zur Durchführung der ESK eine Einblendung im HMD präsentiert, die neben den neun 2D-Passpunkten auch eine vertikale und eine horizontale Linie sowie eine Markierung des Displayrandbereiches beinhaltet. Die Linien verlaufen jeweils entlang des Zentrums der mittleren horizontal bzw. vertikal angeordneten Marker, die Markierung des Displayrandbereichs verläuft entlang der Außenkanten des Kalibrierkörpers. Abbildung 5.15 verdeutlicht dies, indem diese „Hilfslinien“ nachträglich rot eingefärbt dargestellt sind. Dies ermöglicht dem Anwender ein schnelles Auffinden der optimalen Position zur Durchführung der Kalibrierung.

Die Kalibrierung wird im Sitzen ausgeführt, um eine ruhige Lage des Oberkörpers zu ermöglichen, der Kalibrierkörper ist auf diese Position ausgerichtet. Die Probanden sitzen daher auf einem rollbaren Stuhl und bewegen sich damit vor dem Kalibrierkörper.

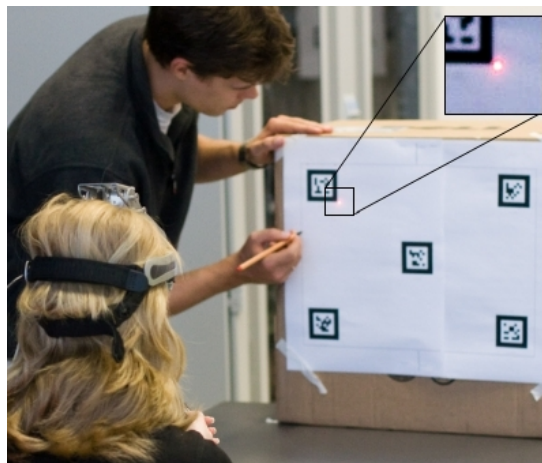
Im unter Kapitel 4.5 beschriebenen Versuch konnte beobachtet werden, dass die Entfernung von ca. 100 cm bis 150 cm im Referenzarbeitsplatz etwa die Entfernung darstellte, aus der die meisten Probanden begannen, gezielt auf ein Fach zuzugehen, um daraus Teile zu entnehmen. Daher beträgt bei der ESK die Entfernung zwischen Passpunkten und Trackingkamera ca. 100 cm bis 166 cm. Die Geometrie des Kalibrierkörpers wurde dabei so gestaltet, dass dieser transportabel ist.

## Überprüfung der Qualität der Kalibrierung

Bei der anschließenden Überprüfung der Überlagerungsgenauigkeit besteht eine Schwierigkeit darin, dass die Analyse der Überlagerungsgenauigkeit nicht, wie unter Kapitel 5.2.4 beschrieben, mittels einer zweiten Kamera geschehen kann, da hierfür eine Kamera im Auge des Anwenders nötig wäre. Daher muss die Überlagerungsgenauigkeit vom aktuellen Anwender abgefragt werden.

Somit wurde für die Überprüfung der Überlagerungsgenauigkeit ein Aufbau gewählt, bei dem anhand zweier auf einem Tisch aufgestellter Tafeln mit Testmarkern in 70 cm und 120 cm Entfernung die resultierende Überlagerungsgenauigkeit überprüft wird. Die Testmarker sind so angeordnet, dass sie in der Mitte sowie den vier Ecken des OST-HMDs zu sehen sind (ähnlich zu Abbildung 5.10b) und von der am HMD angebrachten Kamera erfasst werden können.

Abbildung 5.16: Überprüfen der Qualität der Kalibrierung: Probandin markiert Eckpunkte der virtuellen Einblendung mittels Laserpointer



Quelle: Eigene Aufnahme

Auf den Testmarkern werden basierend auf den Ergebnissen der **ESK** und **MSK** nacheinander je zwei Rechtecke eingeblendet, wobei die Probanden mithilfe eines Laserpointers den Versatz zwischen realem Marker und virtueller Einblendung angeben (Abbildung 5.16). Dabei wird die verwendete Projektionsmatrix (ermittelt durch **ESK** bzw. **MSK**) erneut randomisiert, sodass den Probanden jeweils nicht klar ist, welche Projektionsmatrix aktuell genutzt wird.

Insgesamt müssen die Probanden somit nacheinander 80 Punkte mittels Laserpointer markieren. Die markierten Stellen werden durch die Versuchsbetreuung mit einem Stift auf die Tafel übertragen (Markierung an der Stelle des Laserpointer-Punktes) und der Versatz dieser Markierungen zu den einzelnen Eckpunkten der Testmarker nachträglich ausgemessen.

Prinzipbedingt kann zur Ermittlung der Überlagerungsgenauigkeit die Augersatzkamera in dieser Untersuchung nicht genutzt werden, da das **HMD** auf dem Kopf des Probanden getragen wird. Die Methode der Ermittlung der Überlagerungsgenauigkeit mittels Laserpointer-Markierungen ist weniger genau als die zuvor beschriebene Ermittlung mittels Analyse der Bilder der Augersatzkamera. Eine Ursache dafür ist, dass möglicherweise die Hand der Probanden, die den Laserpointer führt, nicht ruhig genug gehalten werden kann (sichtbar im „Zittern“ des Laserpointer-Punktes). Zur Minimierung dieses Problems nutzen die Probanden eine Hand zur Führung des Laserpointes, während die zweite Hand die erste stabilisiert. Weiterhin werden die so ineinander verschränkten

Hände auf dem Tisch abgelegt. Um die Kopfbewegungen zu minimieren und somit ein möglichst „ruhiges“ Bild im AR-Display zu erhalten, stützen die Probanden zusätzlich ihren Kopf auf einer am Tisch angebrachten Kinnstütze ab. Die so erreichbare Genauigkeit der Überlagerung des Laserpointer-Punktes und der Ecken der Rechteck-Einblendungen im Display liegt bei 70 cm Entfernung etwa bei  $\pm 2$  mm. Die Genauigkeit der Übertragung der per Laserpointer markierten Stellen an den Testmarkern liegt bei ca.  $\pm 2$  mm, sodass bei der Analyse maximal Fehler von insgesamt ca.  $\pm 4$  mm in das Ergebnis eingehen können.

### Versuchsablauf

Vor Beginn der Versuche werden die Probanden über Ablauf, Zweck und die Möglichkeit, den Versuch jederzeit abbrechen zu können, informiert und füllen einen Fragebogen zur Erfassung statistischer Daten aus (siehe Anhang A.4). Den Probanden ist freigestellt, wie detailliert sie die Fragen beantworten. Der Fragebogen orientiert sich am Vorgehen, welches von Robertson vorgeschlagen wurde [Rob07] und beinhaltet unter anderem folgende Fragen:

- Computererfahrung
- Computerspielerfahrung
- Erfahrung mit AR / VR
- Erfahrung mit HMDs
- Sehhilfestatus

Danach wird ein Testlauf mit beiden Kalibrierverfahren durchgeführt, die Reihenfolge der Verfahren ist über alle Probanden randomisiert gleichverteilt und die Lichtbedingungen sind homogen. Nach diesem Testlauf führen die Probanden sowohl die ESK als auch die MSK in der gleichen Reihenfolge wie beim Probelauf durch. Bis zum Abschluss der folgenden Untersuchungen darf das HMD nicht mehr auf dem Kopf verschoben werden. Anschließend wird die Qualität beider Kalibrierungen wie beschrieben mithilfe eines Laserpointers überprüft. In einem abschließenden Fragebogen (siehe Anhang A.4) werden subjektive Eindrücke zu den Kalibrierverfahren abgefragt:

- Schwierigkeit der Durchführung
- Standen genügend Informationen zur Bewältigung der Aufgabe zur Verfügung?
- Mentale Belastung
- Physische Belastung
- Verspürter Zeitdruck
- Arbeitsaufwand (geistig und körperlich)
- Frustration (Unsicherheit, Irritiertheit, Überforderung)

### 5.3.3 Arbeitshypothesen

Es wird erwartet, dass die ESK in einer qualitativ gleichwertigen Überlagerungsgenauigkeit resultiert und dabei schneller durchzuführen ist als die MSK. Daher lauten die zu untersuchenden Hypothesen:

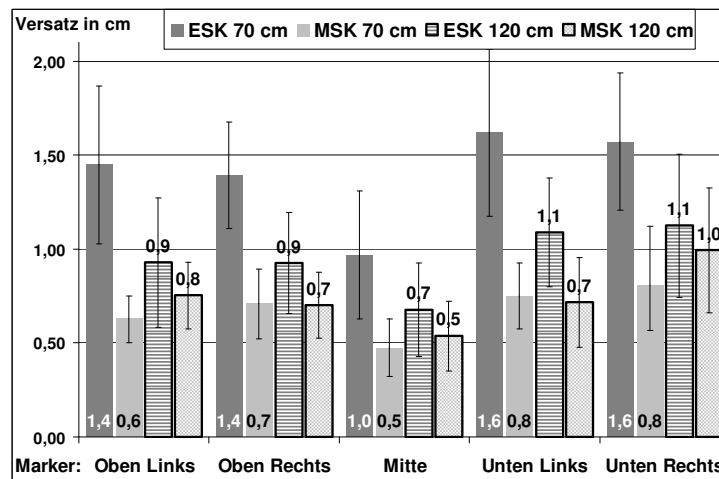
**V4\_H1:** Die ESK liefert die gleiche Überlagerungsgenauigkeit wie die MSK.

**V4\_H2:** Die Zeit zur Durchführung der ESK ist deutlich geringer als die Zeit zur Durchführung der MSK.

### 5.3.4 Ergebnisse

Insgesamt nahmen 22 Personen freiwillig am Versuch teil. Die Daten eines Probanden wurden aufgrund seiner starken Sehschwäche nicht ausgewertet, ein weiterer Proband musste den Versuch aufgrund starker Kopfschmerzen abbrechen. Somit wurde mittels 20 Probanden (18 männlich, 2 weiblich) im Alter von 21-30 Jahren ( $24,9 \pm 2,1$ ) die **ESK** und die **MSK** hinsichtlich des auftretenden Kalibrierfehlers und der Durchführungsdauer untersucht. Die Probanden hatten alle Erfahrung im Umgang mit Computern, elf hatten bereits Erfahrung auf dem Gebiet der **AR**. Weiterhin hatten neun Probanden bereits Umgang mit einem **HMD**, zwei Probanden nutzten **HMDs** bereits mehr als zweimal.

Abbildung 5.17: Durchschnittlicher Kalibrierfehler für Testmarker



Quelle: Eigener Entwurf

Die Auswertung der Kalibrierfehler ist in Abbildung 5.17 aufgeführt. Die Zusammenfassung lässt Rückschlüsse auf die Qualität der verwendeten Ein- und Mehr-Schritt-Verfahren zu:

- In einer Entfernung von 120 cm war die erreichte Überlagerungsgenauigkeit der **MSK** oben links, oben rechts, in der Bildschirmmitte und unten rechts um 0,1 cm bis 0,2 cm besser als das Ergebnis der **ESK**. Einzig im Bildbereich unten links ist das Ergebnis der **MSK** deutlich um 0,4 cm besser als das der **ESK**. Im Durchschnitt war die **MSK** in 120 cm Entfernung um 0,2 cm genauer als die **ESK**.
- In einer Entfernung von 70 cm resultierte die **ESK** in einer etwa doppelt so hohen Abweichung wie die **MSK** und damit in einer deutlich schlechteren Überlagerungsgenauigkeit. Im Durchschnitt zeigte die **ESK** einen um 0,72 cm höheren Fehler als die **MSK**.
- Der durchschnittliche Fehler in 70 cm Entfernung betrug bei der **MSK** 0,68 cm und bei der **ESK** 1,4 cm. In 120 cm Entfernung betrug er 0,74 cm (**MSK**) bzw. 0,94 cm (**ESK**).

Die Zeit zur Durchführung betrug im Mittel:

- **ESK**:  $92 \pm 50,8$  Sekunden (geringster Wert: 19 s, höchster Wert: 243 s)
- **MSK**:  $155 \pm 35,1$  Sekunden (geringster Wert: 84 s, höchster Wert: 247 s)

Bei der subjektiven Beanspruchung, dem Arbeitsaufwand und dem verspürten Zeitdruck gab es keine signifikanten Unterschiede (T-Test).

Zusätzlich wurden folgende Nebenergebnisse festgestellt:

- Bei den meisten Probanden traten nach einer Tragezeit von ca. 20 bis 30 Minuten leichte bis mittlere Beschwerden wie Kopfschmerzen oder Druck an der Stirn auf, was auf den Kopfträger des verwendeten Microvision Nomad ND2100 und das konzentrierte Ablesen vom Display zurückgeführt wird. Im Vergleich zum Versuch unter Kapitel 4.5 durften die Probanden hier das HMD nach der Durchführung der ersten Kalibrierung nicht mehr auf dem Kopf verschieben.
- Ein Proband führte die ESK während des Probedurchlaufs problemlos durch, hatte jedoch beim zweiten Durchlauf deutlich Probleme, die korrekte Position erneut einzunehmen.

### 5.3.5 Auswertung der Untersuchungen zur STK

Innerhalb des Kalibriervolumens, bei 120 cm Entfernung, war das Ergebnis der ESK zwischen ca. 10% bis 35% (0,1 cm bis 0,4 cm) schlechter als das der MSK. Die Unterschiede liegen jedoch im Milimeter-Bereich, die absolut erreichten Genauigkeitswerte liegen im Durchschnitt bei ESK (0,94 cm) und MSK (0,74 cm) unterhalb der 1 cm-Grenze (vgl. Tabelle 5.1).

Im Randbereich sind die mit der ESK erzielten Ergebnisse bei einer Entfernung von 70 cm um bis zu 60% (z.B. oben links: 1,4 cm gegenüber 0,6 cm) ungenauer. Dies ist auf die angesprochene Extrapolation der Werte außerhalb des Kalibriervolumens zurückzuführen, da der Kalibrierbereich der ESK bei 100 cm beginnt, der Kalibrierbereich der MSK jedoch schon bei 87 cm.

Hypothese V4\_H1 trifft somit mit dem aktuellen Setup des Kalibrierkörpers nicht zu. Bei der Planung der Untersuchung wurde bewusst der Vorteil der MSK zugelassen, dass durch sie ein größeres Kalibriervolumen abgedeckt wird als mit dem eingesetzten Kalibrierkörper der ESK. Da innerhalb des Kalibriervolumens die Unterschiede zwischen beiden Verfahren deutlich geringer sind als außerhalb, kann zur weiteren Verbesserung der ESK zukünftig ein Kalibrierkörper verwendet werden, der größeres Kalibriervolumen abdeckt. Die so erreichbare Überlagerungsgenauigkeit der ESK wird jedoch stets um einige Prozent hinter MSK zurück bleiben, da aus den Kommentaren der Anwender deutlich wurde, dass es ihnen etwas schwerer fällt, alle neun 2D-3D-Passpunkte gleichzeitig zu überlagern als die Überlagerung neun mal schrittweise nacheinander durchzuführen.

Bei beiden Verfahren stellt das „Positionieren des Kopfes“ in einer bestimmten Position eine Herausforderung für die Anwender dar, da die Nackenmuskulatur für die notwendigen feinmotorischen Tätigkeiten eher wenig geeignet ist [TZO03]. Insbesondere bei der ESK, bei der mehrere Punkte gleichzeitig in Überlagerung gebracht werden müssen, bedeutet dies einen vergleichsweise hohen Aufwand für den Nutzer. Die Ergebnisse der Studie bestätigen dennoch deutlich, dass die ESK nur ca. 60% der Durchführungsdauer der MSK benötigt und bestätigen damit die Hypothese V4\_H2.



---

## 5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die See-Through-Kalibrierung dient zur Ermittlung einer Transformationsvorschrift, die durch das Trackingsystem gewonnene 3D-Raumkoordinaten in 2D-Displaykoordinaten überführt. Dies ist insbesondere beim Optical See-Through erforderlich, da im allgemeinen die Lage und Orientierung der Trackingsensoren nicht mit der Lage und Orientierung des Displays übereinstimmt.

Aus dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Versuch wurde deutlich, dass beim Einsatz einer kongruenten Überlagerung die lagerichtige Einblendung entscheidend zur korrekten Auftragsbearbeitung beiträgt. Daher wurden im Kapitel 5 Untersuchungen zur Verbesserung der See Through Kalibrierung durchgeführt, wobei die Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit bei gleichzeitig möglichst geringer Durchführungsdauer im Vordergrund stand.

Untersuchungen zur Anordnung und Anzahl der notwendigen 2D-3D-Passpunkte zeigten, dass

- insbesondere die räumliche Verteilung sowohl in der Ebene als auch in der Tiefe
- die gleichmäßige Verteilung über den gesamten Displaybereich einschließlich des Displayrandes

in einer guten Überlagerungsgenauigkeit resultiert. Die höchste Überlagerungsgenauigkeit lag dabei stets im 3D-Schwerpunkt der 3D-Passpunkte. Eine hohe Passpunktanzahl resultiert dabei nicht zwangsläufig in einer besseren Überlagerungsgenauigkeit als eine geringe.

Daher wurden zwei Kalibrierverfahren entwickelt:

- Die Mehr-Schritt-Kalibrierung (**MSK**) geht von der Durchführungsweise nach Tuceryan et al. aus [TGN02]. In einzelnen aufeinander folgenden Schritten werden 2D-3D-Punktkorrespondenzen aufgenommen. Im Unterschied zum Verfahren von Tuceryan et al. werden dem Nutzer zu jeder Punktkorrespondenz Hilfeinblendungen präsentiert, durch die vorgegeben wird, aus welcher Richtung und Entfernung der 2D-Punkt mit seiner jeweiligen 3D-Korrespondenz überlagert werden muss.
- Die Ein-Schritt-Kalibrierung (**ESK**) ist die konsequente Weiterentwicklung der **MSK**, sodass dem Anwender die einzelnen Punktkorrespondenzen nicht nacheinander sondern zur gleichen Zeit eingeblendet werden. Der Anwender schaut auf einen Kalibrierkörper, an dem die Position von 3D-Punkten per Tracking erfasst wird und bekommt gleichzeitig eine Einblendung aller korrespondierenden 2D-Punkte im Display dargestellt. Dadurch können alle 2D-3D-Punktkorrespondenzen in einem einzigen Schritt aufgenommen werden. Aufgrund der zuvor genannten Untersuchungen zur Anzahl und Verteilung der 2D-3D-Passpunkte wurde ein Kalibrierkörper entworfen, der den gesamten Displaybereich abdeckt, wobei neun Passpunkte in unterschiedlichen Entfernungen angeordnet sind.

In einer anschließenden Untersuchung mit Probanden wurde deutlich, dass die Verfahren die Anforderungen an die Überlagerungsgenauigkeit und Handhabbarkeit erfüllen können.



Tabelle 5.2: Auswertung hinsichtlich der Anforderungen an die Kalibrierung

Handhabbarkeit	Überlagerungsgenauigkeit
<p><i>max. 1 Minute Dauer bei erfahrenerem Nutzer:</i> Unerfahrene Benutzer konnten die Kalibrierung mit der <b>ESK</b> in durchschnittlich 92 Sekunden durchführen. Ein Proband konnte die Kalibrierung in 19 Sekunden absolvieren, daher ist anzunehmen, dass erfahrene Nutzer maximal eine Minute zur Durchführung benötigen.</p>	<p><i>weniger als 1 cm Abweichung bei Arbeitsentfernung:</i> Sowohl bei der <b>ESK</b> als auch der <b>MSK</b> ist bereits bei einer Passpunktzahl von 9 räumlich gut verteilten Passpunkten ein Überlagerungsfehler von unter 1 cm möglich. Auf die räumliche Verteilung und die gleichmäßige Verteilung im 2D-Display ist besonders Wert zu legen, wobei der 3D-Schwerpunkt möglichst auf Arbeitsentfernung liegen sollte.</p>
	<p><i>möglichst robust gegenüber ungenauer Durchführung:</i> Durch die Vorgabe bestimmter fester 2D-Positionen im Display sowie 3D-Positionen im Raum wird sowohl bei der <b>ESK</b> als auch der <b>MSK</b> vermieden, dass ungeeignete Werte zur Erstellung der Kalibriermatrix genutzt werden. Dies gelingt den Anwendern bei der <b>MSK</b> besser als bei der <b>ESK</b>.</p>

Tabelle 5.2 stellt das Ergebnis komprimiert dar. In der aktuellen Konfiguration kann durch die **ESK** insbesondere die Handhabbarkeit verbessert werden, wohingegen die **MSK** die bessere Überlagerungsgenauigkeit bietet.

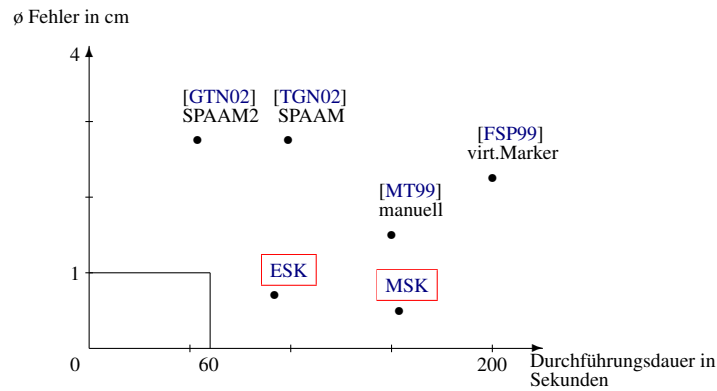
Das hier verwendete **AR**-System und der genutzte **ESK**-Kalibrierkörper bieten bisher den Nachteil, durch eine geringe Kameraauflösung von 640x480 Bildpunkten, kleine Markergrößen von 60 mm Kantenlänge und der daraus resultierenden geringen Bildpunktanzahl, die die Marker im Kamerabild einnehmen<sup>22</sup>, teilweise ungenaue Trackingdaten in für die Berechnung der Projektionsmatrix zu nutzen. Dies wurde in Kapitel 5.2.4 bereits dargelegt. Der **ESK**-Kalibrierkörper sollte daher so erweitert werden, dass zukünftig größere Marker verwendet werden, um auch beim Einsatz von Kameras mit geringer Auflösung eine gute Trackingqualität zu gewährleisten. Für die **MSK** sollten aus dem selben Grund ebenfalls möglichst große Marker genutzt werden.

Beide evaluierten Verfahren zeigten deutlich bessere Ergebnisse, als das bisherige **SPAAM**-Verfahren nach Tuceryan et al. Bezogen auf die Schranken von 1 cm Überlagerungsgenauigkeit und 60 Sekunden Durchführungsdauer ist das entwickelte Verfahren der **ESK** nahezu optimal für den Einsatz am Referenzarbeitsplatz und deutlich besser, als das erste Ein-Schritt Verfahren (vgl. Seite 98). Die **ESK** verkürzt die Durchführungsdauer fast auf die Hälfte der benötigten Zeit verglichen zur **MSK** und kann beim Einsatz eines Kalibrierkörpers mit vergrößertem Kalibriervolumen eine ähnlich hohe Qualität der Überlagerungsgenauigkeit erreichen, wie die **MSK**.

Bei der Mehr-Schritt-Kalibrierung wird durch die nacheinander folgenden Aufnahmen der einzelnen 2D-3D-Punktkorrespondenzen aus vorgegebenen

<sup>22</sup> aktuell ca. 2.500 Bildpunkte, empfohlene Anzahl ca. 30.000, vgl. [Pen09]

Abbildung 5.18: Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der recherchierten und neuen Verfahren



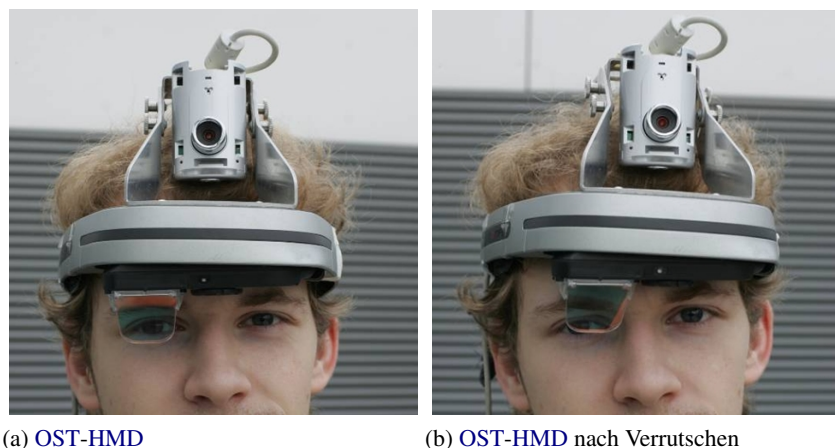
Quelle: Eigener Entwurf basierend den Abbildungen 3.7 und 5.1

Positionen eine höhere Überlagerungsgenauigkeit erreicht als bei der **ESK**. Zur Durchführung wird jedoch fast die doppelte Zeit benötigt. Daher sollte sie in Szenarien eingesetzt werden, bei denen eine höhere Überlagerungsgenauigkeit erforderlich ist als am Referenzarbeitsplatz.

Durch die bisherigen Verfahren der See-Through-Kalibrierung kann noch nicht sichergestellt werden, dass der Anwender tatsächlich die vorgegebenen 2D- und 3D-Positionen beim Kalibriervorgang korrekt miteinander überlagert. Der Nachweis der Tauglichkeit der **ESK** und **MSK** im realen Arbeitsprozess steht bisher noch aus. Zukünftige Verbesserungen der **ESK** und **MSK** sollten daher darauf ausgerichtet sein, den Anwender bei der Navigation in die korrekte Position zu unterstützen sowie durch eine Voranalyse der Eingabewerte oder den Einsatz der Bündelblockausgleichsrechnung [**Kra94**] extreme Ausreißer zu vermeiden.

In Szenarien, die eine hohe Überlagerungsgenauigkeit bei gleichzeitig geringer Durchführungsdauer benötigen und somit weder die **ESK** noch die **MSK** geeignet ist, kann möglicherweise ein „hybrider“ Ansatz, bei dem nicht alle Passpunkte gleichzeitig überlagert werden, die Überlagerungsgenauigkeit und Handhabbarkeit weiter verbessern. Dabei könnten alle 2D-3D-Werte zum Beispiel in zwei Schritten aufgenommen werden (1x vier und 1x fünf 2D-3D-Überlagerungen). Dadurch ist eine Kompensation möglicherweise fehlerhaft überlagerter 2D-3D-Passpunkte besser möglich, als im Ein-Schritt-Verfahren, sodass eine höhere Überlagerungsgenauigkeit erreicht werden kann. Gleichzeitig verringert sich möglicherweise die Durchführungsdauer gegenüber der Mehr-Schritt-Kalibrierung.

Abbildung 5.19: Nach Verrutschen des **HMDs** ist eine Anpassung der Kalibriermatrix notwendig



(a) OST-HMD

(b) OST-HMD nach Verrutschen

Quelle: Eigener Entwurf

Insbesondere beim längerfristigen Einsatz der mobilen AR-Technologie wurde deutlich, dass die Anwender von Zeit zu Zeit die Position des HMDs auf dem Kopf verändern (vgl. Kapitel 4.5.3). In einem industriellen Umfeld ist zudem damit zu rechnen, dass sich im Laufe einer Arbeitsschicht durch „Anstoßen“ oder Arbeitspausen die Position des HMDs oder des Trackingsensors auf dem Kopf verändert (Abbildung 5.19). Hierdurch wird je nach Genauigkeitsanforderungen der Anwendung die einmal durchgeführte STK ungültig und eine Neukalibrierung erforderlich. Daher ist es ein weiteres zukünftiges Ziel, diese erneute manuelle Kalibrierung zu vermeiden, indem durch eine Sensorik eine voll- oder teilautomatische See-Through-Rekalibrierung ermöglicht wird. Eine mögliche Vorgehensweise kann es sein, Verfahren der visuellen Odometrie [Kip07] einzusetzen, die durch Analyse einzelner, aufeinander folgender Bilder einer zweiten am HMD angebrachten Kamera Bewegungsparameter bestimmen. Die so ermittelten Werte könnten für den Einsatz der in Formel 2.13 benannten zweiten Transformationsmatrix  $N$  und somit zur online-Modifikation der Projektionsmatrix  $P$  genutzt werden.

---

## 6.1 Zusammenfassung

Die Augmented Reality Technologie stellt ein Hilfsmittel dar, welches Werker in unterschiedlichen industriellen Anwendungen durch die Bereitstellung bedarfsgerechter Informationen unterstützen kann. Dies gilt besonders für Anwendungen der Automobilindustrie. Insbesondere die kongruente Überlagerung mit Optical-See-Through Head-Mounted Displays ist für den industriellen Einsatz sinnvoll, da so einerseits beim Werker die Hände frei bleiben und andererseits seine Sicht auf die Umwelt nicht durch die AR-Hardware eingeschränkt wird. Jedoch wurden bisher wesentliche dringend erforderliche Untersuchungen zu den Auswirkungen des Langzeiteinsatzes solcher AR-Systeme auf die Beanspruchungslage des Anwenders nicht durchgeführt. Daher stellte die Konzeption und Durchführung von Untersuchungen zur Auswirkung des Langzeiteinsatzes mobiler AR-Systeme unter Beachtung von Anforderungen aus der Automobilindustrie das wesentliche Ziel der vorliegenden Arbeit dar.

Für die Durchführung von Untersuchungen zur Leistung und Beanspruchung beim Langzeiteinsatz können Analysen im realen industriellen Umfeld, in einer Laborumgebung oder allein durch theoretische Modelle stattfinden. Es wurde gezeigt, dass zunächst Untersuchungen im Labor notwendig sind, bevor Feldversuche durchgeführt werden können. Theoretische Modelle eignen sich aufgrund ihrer Unvollständigkeit nicht für die Durchführung von Langzeituntersuchungen. Für die Auswahl einer Anwendung wurden die Szenarien Kommissionierung, Montage und Qualitätssicherung miteinander verglichen und bewertet. Die Kommissionierung eignet sich besonders, da sie quantitative und qualitative Aussagen zum Arbeitsergebnis, einen einfach wiederherstellbaren Ausgangszustand sowie den Einsatz von Fachpersonal und nicht-Fachpersonal ermöglicht. Daher wurde als Anwendungsszenario für den „Referenzarbeitsplatz“ die Kommissionierung ausgewählt und ein Versuchskonzept entworfen, an dem sowohl die menschliche Leistung als auch Parameter der objektiven und subjektiven Beanspruchung ermittelt und zueinander in Bezug gebracht werden können.

Um die mobile Augmented Reality Technologie am erstellten Referenzarbeitsplatz hinsichtlich ihrer Tauglichkeit im Langzeiteinsatz zu untersuchen, musste ein mobiles AR-System erstellt werden. Dabei wurde speziell anhand der Eigenschaften der heute verfügbaren HMDs deutlich, dass diese bisher nicht für einen Langzeiteinsatz geeignet sind, da viele der Geräte bisher zu schwer sind oder eine zu geringe Sicht auf die reale Welt ermöglichen. Es wurde jedoch auch deutlich, dass die bisher existierenden Anforderungen an die Geräte hinsichtlich einer optimalen Anpassung an den Anwender unbekannt sind. Bisherige Anforderungen wie „gute Schwerpunktlage“ oder „kein zu hohes Gewicht“ sind nicht quantifiziert und müssen zukünftig detailliert werden. Daher wurde basierend auf dem bisher bestmöglichen HMD „Microvision Nomad ND2100“ ein AR-System für den Einsatz am Referenzarbeitsplatz erstellt. Aktuelle Forschungsarbeiten bezüglich der HMD-Technologie deuten jedoch darauf hin, dass zukünftig besser geeignete Geräte erhältlich sein werden.

Einer der wichtigsten Einsatzbereiche der mobilen AR ist die Unterstützung der Navigation des Anwenders. Da eine solche auch im Referenzarbeitsplatz nötig und möglich ist, wurde eine Untersuchung durchgeführt, bei dem die beiden AR-gestützte Verfahren „implizite YAH-Karte“ und „explizite Pfeilnavigation“ mit einem nicht-AR-gestützten Verfahren (Papierkarte) verglichen wurden. Im Ergebnis war die Navigation mittels beider AR-gestützten Verfahren schneller als ohne AR, wobei leichte Vorteilen der expliziten Pfeilnavigation sichtbar waren. Daher wurde für das AR-System am Referenzarbeitsplatz eine explizite Pfeilnavigation realisiert.

Mit dem so erstellten AR-System wurde ein Versuch zur Analyse der Beanspruchung beim Langzeiteinsatz durchgeführt. 20 Probanden kommissionierten im Versuchsbereich jeweils für zwei Stunden sowohl mit Hilfe des AR-Systems als auch mit Hilfe einer Papierliste. Jeweils vor und nach der Kommissionierarbeit wurde die aktuelle Beanspruchungssituation durch Fragebögen aufgenommen. Während der Versuchsdurchführung trugen die Probanden einen Langzeit-EKG-Rekorder zur Untersuchung der objektiven Beanspruchung mittels HRV-Analyse. Durch die teilautomatisierte Analyse der Arbeitsschrittdauer, Fehleranzahl und Fehlerart wurden qualitative Daten ermittelt.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der Referenzarbeitsplatz geeignet für die Durchführung von Langzeituntersuchungen zur Beanspruchung beim Einsatz der mobilen AR-Technologie ist. Insbesondere die HRV-Analyse, die EZ-Skala sowie der Beschwerdefragebogen konnten dabei für einen Erkenntnisgewinn sorgen und sollten zukünftig in ähnlichen Untersuchungen eingesetzt werden.

Eine allgemeine Höherbeanspruchung durch den Einsatz des genutzten mobilen AR-Systems konnte nicht festgestellt werden. Sowohl die Analyse der subjektiven Daten der EZ-Skala, der Befindlichkeitsskala und der objektiven Daten der Herzratenvariabilität zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen der Arbeit mit und ohne AR-System gegen Ende der zweistündigen Versuchsphase. Beim Einsatz der AR wurde zu Beginn der Arbeit eine geringere Beanspruchung registriert als beim Einsatz der Papierliste. Dies deutet darauf hin, dass die Probanden sich zunächst an das AR-System gewöhnen mussten. Die Analyse der Daten des Beschwerdefragebogens lassen jedoch eine mögliche Höherbeanspruchung des visuellen Systems beim Einsatz der AR vermuten.

Insgesamt konnten durch den Einsatz des mobilen AR-Systems Fehler der Kategorie „Typfehler“ um 75% gegenüber der Papierliste reduziert werden. Jedoch wurden mit dem hier genutzten mobilen AR-System bis zu 30% weniger Teile pro Zeit kommissioniert als mit der Papierliste. Die Analyse der Fehler pro Zeit beim Einsatz der AR deutete ebenfalls darauf hin, dass zunächst eine Eingewöhnung ins System nötig ist. Durch die Möglichkeit, bei der Auswertung der Fehleranalyse in die Fehlerkategorien „Auslassungsfehler“ und „Typfehler“ zu unterscheiden, wurde deutlich, dass im Laufe der Zeit die Anzahl vergessener Teile (Auslassung) steigt. Daher muss erreicht werden, dass die Anwender beim Einsatz der AR möglichst konzentriert sind, um nicht trotz korrekten Verhaltens des AR-Systems Fehler zu begehen.

Das im Versuch eingesetzte mobile AR-System war für einen Langzeiteinsatz suboptimal, da wesentliche technische Komponenten verbessert werden müssen. Die geringe Überlagerungsgenauigkeit der eingesetzten See-Through-Kalibrierung und die hohe Systemlatenz trugen zu Fehlern in der Auftragsbearbeitung bei. Der Tragekomfort des HMD-Kopfträgers wurde von den Probanden als ungenügend eingestuft und muss deutlich verbessert werden.

Die wesentliche Erkenntnis der beschriebenen Untersuchung ist das Potenzial der AR zur Optimierung der Beanspruchung des Anwenders. Da bei der Arbeit mit dem suboptimalen AR-System eine ähnliche Beanspruchung deutlich wurde, wie bei der Arbeit ohne AR-System, besteht die Möglichkeit, durch ein optimiertes AR-System die Beanspruchung weiter zu verringern. Dies kann für einen Einsatz in der Industrie bedeuten, dass Werker, die ein solches optimiertes mobiles AR-System nutzen, geringer belastet sind als mit aktuellen Werkerassistenzsystemen und damit effizienter arbeiten. Insbesondere beim Einsatz moderner Formen der Arbeitsorganisation, bei der Werker viele unterschiedliche und komplexe Arbeitsschritte ausführen, ist durch das AR-System möglicherweise eine Reduzierung des Leistungsdrucks und des Stresses möglich, da auf notwendige Informationen zur Ausführung der Arbeitsschritte sofort und jederzeit über das HMD zugegriffen werden kann. Das Suchen nach Informationen an räumlich ortsfesten Informationsquellen (Monitor, Handbuch) kann entfallen. Hierfür sind weitere Untersuchungen mit einer verbesserten Hard- und Software am Referenzarbeitsplatz nötig. Wesentliche mögliche Verbesserungen des eingesetzten Systems liegen in der Optimierung der See-Through-Kalibrierung, der Verringerung der Systemlatenz, dem Einsatz eines verbesserten HMDs und -Kopfträgers sowie in die Kleidung integrierten Hardwarekomponenten.

Durch die Versuche wurde deutlich, dass die Qualität der See-Through-Kalibrierung entscheidend dazu beiträgt, das Fehlervermeidungspotenzial der AR voll ausnutzen zu können. Daher war es ein anschließendes Ziel, Verfahren der STK so zu verbessern, dass Überlagerungsfehler reduziert werden und somit die AR-Einblendungen korrekt im Display positioniert sind. Dies verringert den Suchaufwand und somit auch die Belastung der Probanden durch den Einsatz des AR-Systems.

Da allein eine geringe Überlagerungsqualität für einen industriellen Einsatz nicht ausreichend ist, sondern das STK-Verfahren auch handhabbar sein muss, wurde für den Vergleich heutiger Verfahren der STK auch die Durchführungsdauer analysiert und verbessert. Hinsichtlich der Handhabbarkeit wurde eine maximale Durchführungsdauer von 60 Sekunden, für die Überlagerungsgenauigkeit ein maximaler Fehler von 1 cm aus Arbeitsentfernung festgelegt. Das bisher oftmals genutzte SPAAM-Verfahren nach Tuceryan et al. wurde



analysiert und festgestellt, dass es bisher für den Einsatz am Referenzarbeitsplatz nicht geeignet ist.

Daher wurde untersucht, wie die Überlagerungsgenauigkeit verbessert werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass die Erhöhung der Passpunktanzahl keine deutliche Verbesserung der Überlagerungsgenauigkeit bewirkt, da teilweise mit sechs 2D-3D-Passpunkten ähnlich gute Ergebnisse wie beim Einsatz von 30 2D-3D-Passpunkten entstanden. Eine daraus folgende Annahme bestand darin, dass insbesondere die räumliche Verteilung der 3D-Passpunkte sowie die Verteilung der 2D-Passpunkte im Display Einfluss auf die Überlagerungsgenauigkeit haben. Dies wurde in einer folgenden Untersuchung bestätigt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die zwei Verfahren der Ein- und Mehr-Schritt-Kalibrierung (**ESK** und **MSK**) eingeführt. Für die **ESK** wurde ein neuer Kalibrierkörper entworfen und gebaut, durch den neun räumlich verteilte 3D-Punkte mit neun über alle Displaybereiche verteilten 2D-Punkten überlagert werden müssen. Bei der **MSK** werden nacheinander 2D-Objekte im Display gezeichnet, die vorgeben, aus welcher Richtung ein 3D-Objekt im Display überlagert werden muss.

In einem Versuch mit 22 Probanden wurden beide neu entwickelten Verfahren hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit und der Durchführungsdauer verglichen. Sowohl das Ergebnis der **MSK** als auch das der **ESK** war besser, als das bisherige SPAAM-Verfahren. In der aktuellen Konfiguration kann durch die **ESK** insbesondere die Durchführungsdauer verbessert werden, wohingegen die **MSK** die bessere Überlagerungsgenauigkeit bietet. Der Überlagerungsfehler der beträgt bei der **MSK** 0,5 cm und bei der **ESK** 0,7 cm in 70 cm Entfernung. Somit ist der Fehler des bisherigen SPAAM-Verfahrens mit 2,5 cm in 70 cm Entfernung um das 3,5 (**ESK**) bzw. 5-fache (**MSK**) höher. Die durchschnittliche Durchführungsdauer betrug bei der **ESK** 92 Sekunden, bei der **MSK** 152 Sekunden wobei insbesondere bei der **ESK** deutlich wurde, dass sie innerhalb der geforderten 60 Sekunden Maximaldauer ausgeführt werden kann.

Da sowohl die **ESK** als auch die **MSK** im kalibrierten Bereich in ähnlichen Überlagerungsfehlern unter 1 cm resultieren, die **ESK** jedoch deutlich schneller durchführbar ist, ist vorgesehen, die **ESK** für die weiteren Untersuchungen am Referenzarbeitsplatz einzusetzen. Eine der wesentlichen Ursachen, weswegen beim Einsatz der **AR** am Referenzarbeitsplatz Fehlgriffe beim Einsatz der **AR** zu verzeichnen waren, war die ungenügende **STK**. Durch die verbesserte Überlagerungsgenauigkeit können diese Fehler weiter reduziert und der Suchaufwand verringert werden.

---

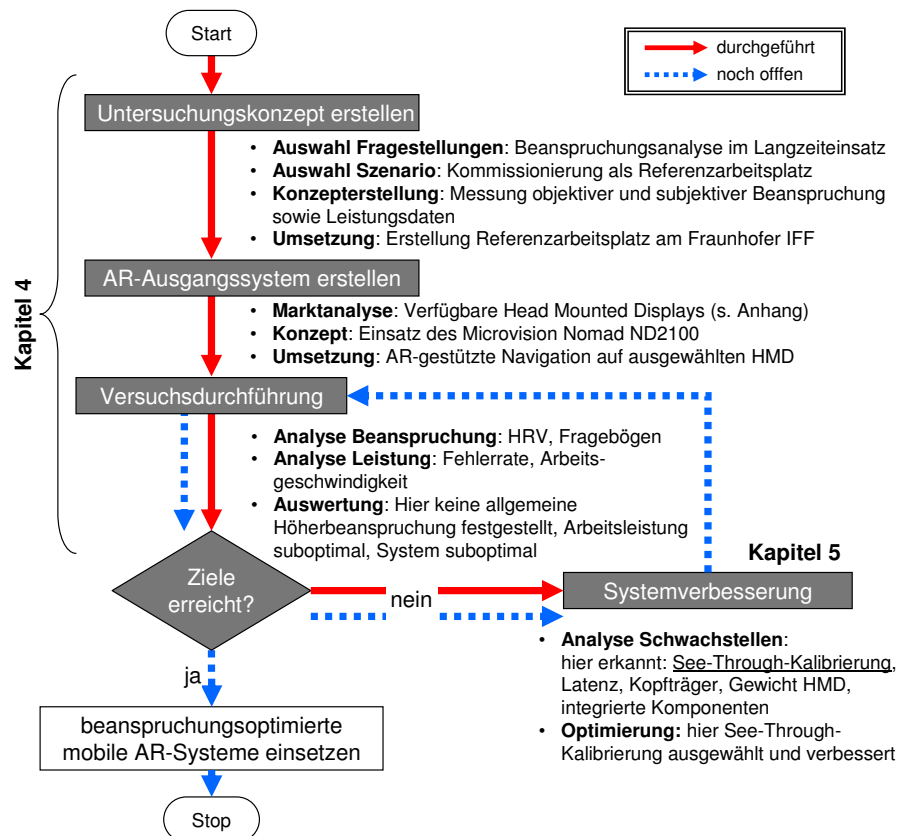
## 6.2 Bewertung des Problemlösungsprozesses

Die beschriebenen Untersuchungen fanden in enger Abstimmung mit Partnern der Automobilindustrie, der Arbeitsmedizin sowie der Wahrnehmungspsychologie statt. Dadurch wurden insbesondere Anforderungen aus der Automobilindustrie berücksichtigt. Durch die Untersuchungen konnte als wesentliche neue Erkenntnis festgestellt werden, dass die mobile **AR**-Technologie auch im Langzeiteinsatz keine negativen Auswirkungen auf die allgemeine Beanspruchungslage des Anwenders hat.

Abbildung 6.1 stellt den der vorliegenden Arbeit zugrunde liegenden Vorgehensplan dar (vgl. Seite 49), in dem die durchlaufenen Arbeitsschritte markiert



Abbildung 6.1: Vorgehensplan zur Untersuchung nutzerbezogener Parameter an einem Referenzarbeitsplatz



Quelle: Eigener Entwurf

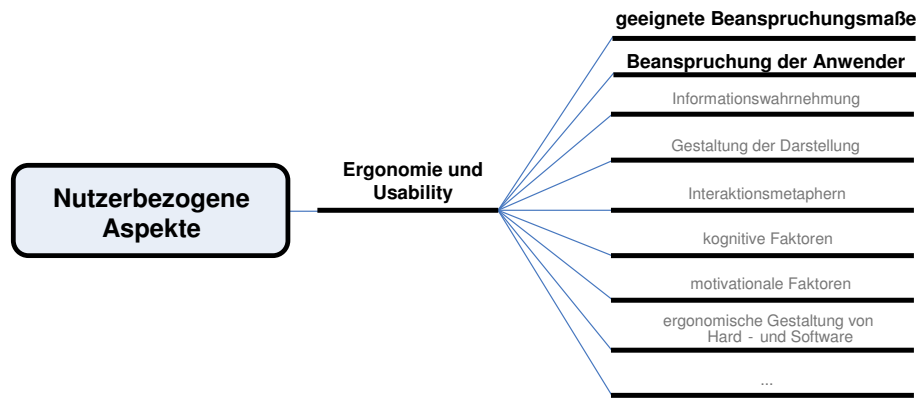
sind. Daraus wird deutlich, dass das finale Ziel der Erstellung eines beanspruchungsoptimierten mobilen AR-Systems erst durch weitere Versuchsreihen jeweils mit anschließender Systemverbesserung erreicht werden kann. Nach dem Durchlaufen weiterer Versuchsreihen werden neue Verbesserungspotenziale identifiziert und Systemverbesserungen vorgenommen, sodass schließlich AR-Systeme generiert werden können, die deutlich besser an den Anwender und den Arbeitsprozess angepasst sind.

Es wurde ein Untersuchungskonzept entwickelt, ein mobiles AR-System als Ausgangsbasis erstellt und daran eine erste Untersuchung durchgeführt. Aufbauend darauf fand eine wesentliche Systemoptimierung statt, indem das Verfahren der See-Through-Kalibrierung speziell hinsichtlich der Überlagerungsgenauigkeit verbessert wurde. Diese Tätigkeiten stellen das Fundament eines weiterführenden Forschungsvorhabens dar (siehe Ausblick, Seite 125).

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Schwerpunkte aus dem Bereich der nutzerbezogenen Fragestellungen sind in Abbildung 6.2 markiert. Aus den in Kapitel 3.5 identifizierten Bereichen der offenen nutzerbezogenen Fragestellungen wurden geeignete Beanspruchungsmaße in Form der HRV, der EZ-Skala und des Beschwerdefragebogens identifiziert. In einer ersten Untersuchung wurde damit die Belastung der Anwender beim Einsatz eines mobilen AR-Systems untersucht und die Erkenntnis gewonnen, dass der Einsatz des verwendeten suboptimalen AR-Systems nur eine solche Belastung für den Anwender darstellt, die eine Beanspruchung hervorruft, die vergleichbar mit der Beanspruchung bei der Arbeit ohne AR-System ist.

Der nächste konsequente Schritt ist eine erneute Versuchsdurchführung mit dem verbesserten AR-System. Aufbauend auf Ergebnissen dieser neuen Untersuchung finden weitere Durchläufe zur Verbesserung des Systems im Rahmen

Abbildung 6.2: In der vorliegenden Arbeit untersuchte Schwerpunkte aus dem Bereich der nutzerbezogenen Fragestellungen



Quelle: Eigener Entwurf

des AVILUS-Projektes statt. Hierbei liegen Schwerpunkte auf Untersuchungen zur Informationswahrnehmung und Gestaltung der Darstellungen. Die Anzahl der notwendigen Durchläufe dieser Iterationsschleife ist heute jedoch noch nicht absehbar, unter anderem da neben den Analysen beim zweistündigen Einsatz auch Untersuchungen mit vier und acht Stunden kontinuierlicher Tragedauer durchzuführen sind, um die Eignung der Technologie auch im Vollschichteinsatz zu gewährleisten.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten wissenschaftlichen Methoden sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Übersicht über verwendete Methoden und Techniken zur Bearbeitung der Fragestellungen der vorliegenden Arbeit

Methode / Technik	wurde genutzt für ...
Brainstorming	Erstellung Aufbaukonzept Referenzarbeitsplatz (Kapitel 4.3.3)
Literaturrecherche	Identifikation verfügbarer HMDs, Tracking-technologien, Schwerpunktauswahl (Kapitel 3)
Probandenversuche	Verifizierung von Hypothesen (Kapitel 4.4.3, 4.5 und 5.3)
Experteninterview	Anforderungsspezifikation für mobile AR-Systeme (Anhang A.1) sowie die See-Through Kalibrierung (Kapitel 5.2.1)

Dadurch war es möglich, wesentlich zur Weiterentwicklung der AR-Technologie beizutragen, da

- ein längerfristig einsetzbares Untersuchungskonzept zur Durchführung von Langzeituntersuchungen an der mobilen AR-Technologie entwickelt und dessen Tauglichkeit nachgewiesen wurde
- erstmals die prinzipielle Tauglichkeit der mobilen AR-Technologie im **Langzeiteinsatz** aufgezeigt wurde
- die Effizienz der eingesetzten See-Through Kalibrierung deutlich verbessert wurde
- weitere wesentliche zukünftig zu verbessernde Schwerpunkte (technisch und nutzerbezogen) identifiziert wurden.

Die konsequente Fortführung der hier begonnenen Arbeiten ist notwendig, um die Technologie zukünftig industriell im Langzeiteinsatz nutzbar zu machen.

### 6.3 Ausblick

Nachdem in der vorliegenden Arbeit ein Untersuchungskonzept und ein AR-Ausgangssystem erstellt, erste Versuche zum Langzeiteinsatz durchgeführt und eine Systemverbesserung in Form der Optimierung der See-Through-Kalibrierung vorgenommen wurde, gilt es, weitere Versuche mit einem verbesserten System zu realisieren (vgl. Abbildung 3.12). Dadurch wird es möglich, zu überprüfen, in wie weit die Systemverbesserung einen Einfluss auf die Beanspruchung des Anwenders hat um nach der konsequenten Fortführung der Untersuchungen mittelfristig beanspruchungsoptimierte mobile AR-Systeme erstellen zu können. Hierfür müssen für eine weitere Analyse objektiver Beanspruchung arbeitsmedizinische Statusuntersuchungen der einbezogenen Probanden, der „Test zur Geteilten Aufmerksamkeit“ sowie der Einsatz von Systemen zur Blickbewegungsanalyse im Referenzarbeitsplatz genutzt werden.

Zur Fortführung der Untersuchungen hinsichtlich der Beanspruchung und Systemoptimierung wurde eine Kooperation mit der Volkswagen AG im Rahmen des AVILUS-Projektes initiiert [Sch08]. Hier ist es vorgesehen, die im Labor ermittelten Ergebnisse auch in der praktischen industriellen Anwendung zu überprüfen, indem die hier vorgestellte Untersuchungsmethodik in produktiven Szenarien eingesetzt wird. Die weitere Systemoptimierung wurde für die Fortführung der Studien am Referenzarbeitsplatz begonnen, indem durch den Einsatz hochwertiger optischer Infrarot-Trackingsysteme die Systemlatenz verringert, durch verbesserte Kopfträger in Kombination mit einem anderen HMD die physische Belastung reduziert und durch verbesserte Zielführungskonzepte die Navigation des Anwenders vereinfacht wurde (Abbildung 6.3). Weiterführende Studien sind für Mitte 2009 vorgesehen.

Abbildung 6.3: Entwurf einer Tunnelvisualisierung nach Günthner et al. [GBRS09]



Quelle: Eigene Aufnahme

In der vorliegenden Arbeit wurde erkannt, dass die Auslegung mobiler AR-Systeme hinsichtlich einer möglichst geringen Belastung des visuellen Systems des Anwenders erforderlich ist. Daher müssen parallel zur Beanspruchungsanalyse Untersuchungen zur optimalen Informationsdarstellung beim Einsatz von HMDs durchgeführt werden. Hierfür wurde in ersten Voruntersuchungen mit Partnern der Wahrnehmungspsychologie der Bauhaus Universität Weimar ein Microvision Nomad ND2100 HMD mit einer Blickbewegungsregistrierung verbunden, um zu untersuchen, wie sich Unterschiede in der Wahrnehmung beim Nutzen eines Head Mounted Displays und eines herkömmlichen Monitors manifestieren [HUT<sup>+</sup>08, HUD<sup>+</sup>08]. Die Untersuchung dieser und weiterer Fragestellungen wird im Rahmen des AVILUS-Projektes fortgesetzt, die Ergebnisse fließen zusammen mit den Analysen am Referenzarbeitsplatz in die Evaluation an praktischen industriellen Szenarien ein.

Mittelfristig ist es so möglich, verbesserte **HMDs** bei Displayherstellern in Auftrag zu geben, die den zuvor ermittelten Anforderungen entsprechen und somit industriell einsetzbar sind.

Speziell beim längerfristigen Einsatz der mobilen **AR**-Technologie wurde für die **STK** deutlich, dass die Anwender von Zeit zu Zeit die Position des **HMDs** auf dem Kopf verändern. Daher werden zukünftig Verfahren entwickelt, die diese Veränderungen automatisiert berücksichtigen. Gleichzeitig soll der bisher genutzte Kalibrierkörper auf ein größeres Trackingvolumen unter Verwendung verbesserter Markerkonfigurationen und einer erweiterten Nutzerführung optimiert werden.

Bisher scheiterte eine Einführung der mobilen **AR**-Technologie trotz des nachgewiesenen immensen Unterstützungspotenzials vor allem an Akzeptanzproblemen beim Endanwender. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen und darauf folgenden geplanten Arbeiten bedeuten für die Industrie, dass die mobile **AR**-Technologie einen wesentlich höheren Benutzbarkeits- und Akzeptanzgrad beim Endanwender haben wird, sodass die auch die ergonomische Qualität der Produkte nicht hinter der technischen zurückbleiben muss. Dies wird sich bei konsequenter Weiterverfolgung der hier beschriebenen Vorgehensweise mittel- bis langfristig auf eine Erhöhung der Produktqualität bei gleichzeitigem Senken der Produktionskosten auswirken.

---

# Literaturverzeichnis

- [ABB<sup>+</sup>01] Azuma, Ronald; Baillot, Yohan; Behringer, Reinhold; Feiner, Steven; Julier, Simon und MacIntyre, Blair: *Recent advances in augmented reality*. Computer Graphics and Applications, 21(6):34–47, 2001. [hier verwendet auf S. 11]
- [Ale05] Alexander, Thomas: *Virtual, Mixed and Augmented Survey - Germany*. Technischer Bericht, FGAN-FKIE Wachtberg, 2005. RTO-TR-HFM-121-Part-I: Virtual Environments for Intuitive Human-System Interaction - National Research Activities in Augmented, Mixed and Virtual Environments, URL: <http://www.rta.nato.int/pubs/rdp.asp?RDP=RTO-TR-HFM-121-Part-I>. [hier verwendet auf S. 44]
- [Alt02] Alt, Thomas: *Augmented Reality in der Produktion*. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau und Volkswagen AG Wolfsburg, 2002. [hier verwendet auf S. 2, 7, 8, 17, 18, 30, 31, 37, 56, 65, 74, 90 und 92]
- [Ama09] *MIKIMOTO Beans iBean*. <http://www.amazon.co.jp/>, 2009. [hier verwendet auf S. 38]
- [AMW87] Arend, Udo; Muthig, Klaus Peter und Wandmacher, Jens: *Evidence for Global Feature Superiority in Menu Selection by Icons*. Behaviour and Information Technology, 6:411–426, 1987. [hier verwendet auf S. 73]
- [And09] Anderson, Daniel: *Entwurf und Implementierung einer Sensorik für die See-Through-Rekalibrierung von optischen Durchsicht-displays*. Studienarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2009. [hier verwendet auf S. LV]
- [ART08] *Webseite der Advanced Realtime Tracking (A.R.T.) GmbH*. URL: <http://www.ar-tracking.de/>, 2008. Stand: 11.10.2008. [hier verwendet auf S. 31]

- [Azu97] Azuma, Ronald T.: *A Survey of Augmented Reality*. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6*, Seiten 355–385. MIT Press, 1997. [hier verwendet auf S. 7]
- [Bal08] Ballew, Pat: *Origins of some arithmetic terms*. URL: <http://www.pballew.net/arithme3.html>, 2008. [hier verwendet auf S. 66]
- [BAW04] Bailey, R. E.; Arthur, J. J. und Williams, S. P.: *Latency requirements for head-worn display S/EVS applications*. In: Verley, Jacques G. (Herausgeber): *Proceedings of the SPIE Enhanced and Synthetic Vision*, 2004. [hier verwendet auf S. 90]
- [BAWK05] Bailey, R. E.; Arthur, J. J.; Williams, S. P. und Kramer, L. J.: *Latency in Visionic Systems: Test Methods and Requirements*. Technischer Bericht, NASA Langley Research Center, Hampton, USA, 2005. [hier verwendet auf S. 90]
- [BF07] Bilandzic, Mark und Foth, Marcus: *Urban Computing and Mobile Devices*. PERVASIVE computing, 2007. [hier verwendet auf S. 33]
- [BFH02] Bell, Blaine; Feiner, Steven und Hollerer, Tobias: *Information at a Glance*. IEEE Computer Graphics and Applications, 22(4):6–9, 2002. [hier verwendet auf S. 42 und 43]
- [BFO92] Bajura, Michael; Fuchs, Henry und Ohbuchi, Ryutarou: *Merging virtual objects with the real world: seeing ultrasound imagery within the patient*. In: *SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 203–210, New York, NY, USA, 1992. ACM Press. [hier verwendet auf S. 32]
- [BKJP05] Bowman, Doug A.; Kruijff, Ernst; Jr., Joseph J. LaViola und Poupyrev, Ivan: *3D User interfaces: Theory and Practise*. AddisonWesley, USA, 2005. [hier verwendet auf S. 41]
- [BL06] Bokranz, Rainer und Landau, Kurt: *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen: MTM-Handbuch*. Schäffer-Poeschel, 2006. [hier verwendet auf S. 31]
- [BMS98] Bowden, R.; Mitchell, T. A. und Sarhadi, M.: *Reconstructing 3D Pose and Motion from a Single Camera View*. In: Carter, John N. und Nixon, Mark S. (Herausgeber): *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, Band 2, Seiten 904–913. University of Southampton, 1998. [hier verwendet auf S. 13]
- [BOH<sup>+</sup>08] Bichlmeier, Christoph; Ockert, Ben; Heining, Sandro Michael; Ahmadi, Ahmad und Navab, Nassir: *Stepping into the Operating Theater: ARAV - Augmented Reality Aided Vertebroplasty*. In: *7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 165–166, 2008. [hier verwendet auf S. 32]
- [Boy09] Boyd, Clark: *SixthSense blurs digital and the real*. BBC News, 2009. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/7997961.stm>, Stand 18.04.2009. [hier verwendet auf S. 16 und 33]

- [BR98] Biocca, Frank A. und Rolland, Jannick P.: *Virtual Eyes Can Rearrange Your Body: Adaptation to Visual Displacement in See-Through, Head-Mounted Displays*. Presence: Teleoper. Virtual Environ., 7(3):262–277, 1998. [hier verwendet auf S. 18, 20 und 21]
- [Bro04] Broll, Wolfgang: *Augmented Reality für Architektur und Städtebau*. wt Werkstattstechnik online, (3), 2004. [hier verwendet auf S. 32]
- [BSC06] Brown, Dennis G.; Stripling, Roy und Coyne, Joseph T.: *Augmented Reality for Urban Skills Training*. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2006 Conference*, Seiten 12–15, 2006. [hier verwendet auf S. 32]
- [BTP08] Bade, Christian; Tümler, Johannes und Paul, Georg: *Stationary and Mobile Augmented Reality in Industrial Applications*. In: *Proceedings of the International Conference on Information Technologies*, Seiten 213–222, Sofia, Bulgarien, 2008. Publishing House King. [hier verwendet auf S. 11, 47 und XXXVII]
- [BUDS05] Brau, Henning; Ullmann, Christine; Duthweiler, Michael und Schulze, Hartmut: *Gestaltung von Augmented Reality Applikationen für Kommissionieraufgaben*. In: *Zustandserkennung und Systemgestaltung 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme 13. bis 15. Oktober 2005 (ZMMS Spektrum Band 19)*, Band 22 der Reihe *Fortschritt-Berichte*, Düsseldorf, 2005. VDI Verlag GmbH. [hier verwendet auf S. 44, 45 und 46]
- [Bue03] Buecher, Robert: *Wearable mobile display based on the human physiology to set new standards for human machine interfaces*. In: *The 22nd Digital Avionics Systems Conference*, Band 2, Seiten 9.E.4.1–9.E.4.4, 2003. [hier verwendet auf S. 38 und 39]
- [Bur06] Burns, Seamus: *Paper-like Displays Enabled by Flexible AM OTFT Backplanes*. Produktpräsentation, Plastic Logic, 2006. [hier verwendet auf S. 16]
- [Can04] Canis, Daniel: *Einsatz von Augmented Reality Technologien im Produktentwicklungsprozess*. Diplomarbeit, Burg Giebichenstein Hochschule für Kunst und Design Halle, Volkswagen AG Wolfsburg, 2004. [hier verwendet auf S. 31]
- [CBM95] Cerutti, S.; Bianchi, A. M. und Mainardi, L. T.: *Spectral analysis of the heart rate variability signal*. In: Malik, M. und Camm, J. A. (Herausgeber): *Heart Rate Variability*, Armonk, NY, 1995. Futura Publishing Company. [hier verwendet auf S. 82]
- [CCM98] Carney, Cher; Campbell, John L. und Mitchell, Elizabeth A.: *In-Vehicle Display Icons and Other Information Elements: Literature Review*. Technischer Bericht, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1998. [hier verwendet auf S. 73]
- [CHHES08] Chandra, Sandra Keller; Hoehne-Hückstädt, Ulrike; Ellegast, Rolf und Schäfer, Peter: *BGIA-Report 03/2008: Ergonomische*



*Anforderungen an Eingabemittel für Geräte der Informationstechnik.* Technischer Bericht, BGIA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2008.

[hier verwendet auf S. 54]

- [CJP03] Caarls, Jurjen; Jonker, Pieter und Persa, Stelian: *Sensor Fusion for Augmented Reality.* In: Aarts, Emile H. L.; Collier, René; Loenen, Evert van und Ruyter, Boris E. R. de (Herausgeber): *EUSAI*, Band 2875 der Reihe *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 160–176. Springer, 2003. [hier verwendet auf S. 33]
- [CR06] Cakmakci, Ozan und Rolland, Jannick P.: *Head-worn displays: A review.* *Journal of Display Technology*, 2, 2006. [hier verwendet auf S. 39]
- [CRWGT05] Creem-Regehr, S. H.; Willemsen, P.; Gooch, A. A. und Thompson, W. B.: *The influence of restricted viewing conditions on egocentric distance perception: Implications for real and virtual indoor environments.* In: *Perception 34*, Seiten 191–204, 2005. [hier verwendet auf S. 46]
- [Dav89] Davis, Fred D.: *Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology.* *MIS Quarterly*, (9):319–339, 1989. [hier verwendet auf S. 45]
- [DBBG06] Doswell, Jayfus T.; Blake, M. Brian und Butcher-Green, Jerome: *Mobile Augmented Reality System Architecture for Ubiquitous e-Learning.* In: *WMTE '06: Proceedings of the Fourth IEEE International Workshop on Wireless, Mobile and Ubiquitous Technology in Education*, Seiten 121–123, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 38]
- [DBDM95] Duke, D.; Barnard, P.; Duce, D. und May, J.: *Systematic development of the human interface.* In: *APSEC'95: Second Asia-Pacific Software Engineering Conference*, Seiten 313–321. IEEE Computer Society Press, 1995. [hier verwendet auf S. 53]
- [DGB08] Dünser, Andreas; Grasset, Raphaël und Billingham, Mark: *A Survey of Evaluation Techniques Used in Augmented Reality Studies (TR-2008-02).* Technischer Bericht, University of Canterbury, HITLabNZ, 2008. [hier verwendet auf S. 45]
- [DHS04] DiVerdi, Stephen; Höllerer, Tobias und Schreyer, Richard: *Level of Detail Interfaces.* In: *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 300–301, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 46]
- [DMHF05] Dangelmaier, Wilhelm; Mueck, Bengt; Höwer, Matthias und Franke, Werner: *AR Support for Picking.* In: Schulze, Thomas; Horton, Graham; Preim, Bernhard und Schlechtweg, Stefan (Herausgeber): *SimVis*, Seiten 355–364. SCS Publishing House e.V., 2005. [hier verwendet auf S. 41]
- [Doi03] Doil, Fabian: *Augmented Reality gestützte Fabrik- und Anlagenplanung.* Diplomarbeit, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, 2003. [hier verwendet auf S. 31]

- [Dos08] Doswell, Jayfus T.: *Wearable Augmented Reality System Architecture: Mobile Assistance and Training*. In: *Proceedings of X Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR 2008)*, Joao Pessoa, Brazil, 2008. [hier verwendet auf S. 38]
- [DP02] Darken, Rudolph P. und Peterson, Barry: *Spatial orientation, wayfinding, and representation*, Seiten 493–518. Lawrence Erlbaum Associates, 2002. [hier verwendet auf S. 41]
- [DS77] Downs, R. und Stea, D.: *Maps in Minds: Reflections on Cognitive Mapping*. In: Gifford, R. (Herausgeber): *Environmental Psychology*, Allyn & Bacon, 1977. [hier verwendet auf S. 41]
- [DS93] Darken, Rudolph P. und Sibert, John L.: *A Toolset for Navigation in Virtual Environments*. In: *Proceedings of the ACM User Interface Software and Technology*, Seiten 157–165, 1993. [hier verwendet auf S. 41]
- [DSAP03] Doil, F.; Schreiber, W.; Alt, T. und Patron, C.: *Augmented reality for manufacturing planning*. In: *Proceedings of the Workshop on Virtual environments*, Seiten 71–76, New York, NY, USA, 2003. ACM Press. [hier verwendet auf S. 31]
- [EMER<sup>+</sup>02] Edelmann, Martin; Malzkorn-Edling, Silke; Rottenkolber, Birgit; Schreiber, Werner und Alt, Thomas: *Ergonomics of Head Mounted Displays and Studies About Effects on Eye Physiology and Well-Being*. In: *Proceedings of the Conference WW-DU 2002 World Wide Work - 2002*, Seiten 382–383, Berchtesgaden, 2002. Abingdon, Oxon, UK : Taylor & Francis. [hier verwendet auf S. 46]
- [ENB90] Eilers, Karin; Nachreiner, Friedhelm und Böning, Erwin: *Zur subjektiven Skalierung psychischer Beanspruchung - Teil 2: Überprüfung der Validität verankerter Relativurteile in einer Felduntersuchung*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft Nr. 44 (16NF), Seite 24ff., 1990. [hier verwendet auf S. 67]
- [FAD02] Furmanski, Chris; Azuma, Ronald und Daily, Mike: *Augmented-reality visualizations guided by cognition: perceptual heuristics for combining visible and obscured information*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 215–320, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 73]
- [Fah69] Fahrenberg, Jochen: *Die Bedeutung individueller Unterschiede für die Methodik der Aktivierungsforschung*. In: Schönpflug, Wolfgang (Herausgeber): *Methoden der Aktivierungsforschung*, Bern, Stuttgart, 1969. Huber. [hier verwendet auf S. 45 und 66]
- [Fen08] Fenn, Jackie: *Understanding Gartner's Hype Cycles*. URL: <http://www.gartner.com/DisplayDocument?id=709015>, 2008. (Stand 31.10.2008). [hier verwendet auf S. 30]
- [FPUW06] Frauendorf, H.; Pfister, E. A.; Ulmer, H. V. und Wirth, D.: *Arbeitsmedizinische Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V.: Nutzung der Herzschlag-*

*frequenz bei arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen. Arbeitsmedizin. Sozialmedizin. Umweltmedizin* 41 7, Seiten 352–355, 2006. [hier verwendet auf S. 68 und XXXI]

- [Fri04] Friedrich, Wolfgang (Herausgeber): *ARVIKA Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service*. Publicis Corporate Publishing Verlag, Erlangen, 1. Auflage, 2004. URL: <http://www.arvika.de/>. [hier verwendet auf S. 2, 15, 30 und 34]
- [Fri06] Fritzsche, Lars: *Eignung von Augmented Reality für den Vollschichteneinsatz in der Automobilproduktion - Eine Laboruntersuchung zur psychischen Belastung und Beanspruchung bei der Arbeit mit einem monokularen Head Mounted Display*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, 2006. [hier verwendet auf S. 3 und 92]
- [FSP99] Fuhrmann, Anton; Schmalstieg, Dieter und Purgathofer, Werner: *Fast calibration for augmented reality*. In: *VRST '99: Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, Seiten 166–167, New York, NY, USA, 1999. ACM Press. [hier verwendet auf S. 39, 40 und 117]
- [FW06] Friedrich, Wolfgang und Wohlgemuth, Wolfgang: *ARTESAS - Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Bildung und Forschung, TIB Hannover, URL: <http://www.artesas.de/>, 2006. [hier verwendet auf S. 2 und 33]
- [GAH07] Goldiez, B. F.; Ahmad, A. M. und Hancock, P. A.: *Effects of Augmented Reality Display Settings on Human Wayfinding Performance*. In: *Transactions on IEEE*, Band 37, Seiten 839–845, 2007. [hier verwendet auf S. 75]
- [GB90] Green, A. J. K. und Barnard, P. J.: *Iconic interfacing: The role of icon distinctiveness and fixed or variable screen locations*. In: Diaper, D.; Gilmore, D.; Cockton, G.; und Shackel, B. (Herausgeber): *Human-Computer Interaction - INTERACT '90*, Amsterdam, Niederlande, 1990. Elsevier Science Publishers. [hier verwendet auf S. 73]
- [GBRS09] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R. und Schedlbauer, M.: *Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung*. Technischer Bericht, Technische Universität München, Lehrstuhl fml, 2009. [hier verwendet auf S. 43, 56, 125 und XXXVI]
- [GCGM03] Görnandt, V.; Clasbrummel, B.; Gerboth, A. und Muhr, G.: *Überlegungen zur Beleuchtung am Begutachtungsort bei farbrelevanten telemedizinischen Anwendungen*. Technischer Bericht, Berufsgenossenschaftliche Kliniken Bergmannsheil, Universitätsklinik Bochum, 2003. [hier verwendet auf S. 54]
- [Gol97] Goldstein, E. Bruce: *Wahrnehmungspsychologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1997. [hier verwendet auf S. 48]
- [Gol07] Goldscheid, Christian: *Modellierung von Kommissioniersystemen - Ermittlung der qualitätsrelevanten Daten*. Workshop

im Forschungsprojekt QUINKOM, [http://quinkom.de/Dokus/Vortrag\\_Modellierung\\_von\\_Kommissioniersystemen.pdf](http://quinkom.de/Dokus/Vortrag_Modellierung_von_Kommissioniersystemen.pdf), 2007.  
[hier verwendet auf S. 65]

- [Gri82] Griffin, John R.: *Binocular Anomalies: Procedures for Vision Therapy*. Professional Press, Chicago, IL, USA, 1982.  
[hier verwendet auf S. 80]
- [GRS03] Gandy, Maribeth; Ross, David und Starner, Thad E.: *Universal design: lessons for wearable computing*. Pervasive Computing, IEEE, 2(3):19–23, 2003. [hier verwendet auf S. 12 und 45]
- [GS08] Gabbard, Joseph L. und Swan, J. Edward II: *Usability Engineering for Augmented Reality: Employing User-based Studies to Inform Design*. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Band 14, 2008. [hier verwendet auf S. 45]
- [GTKN01] Genc, Yakup; Tuceryan, Mihran; Khamene, Ali und Navab, Nassir: *Optical See-through Calibration with Vision-Based Trackers: Propagation of Projection Matrices*. In: *ISAR '01: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, Seite 147, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 39]
- [GTM08] Grubert, Jens; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Untersuchungen zur Optimierung der See Through Kalibrierung für mobile Augmented Reality Assistenzsysteme*. In: *Forschung vernetzen - Innovationen beschleunigen, wissenschaftliches Kolloquium*. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg, 2008. [hier verwendet auf S. 100 und LV]
- [GTN02] Genc, Yakup; Tuceryan, Mihran und Navab, Nassir: *Practical Solutions for Calibration of Optical See-Through Devices*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seite 169, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 24, 25, 26, 40, 97 und 117]
- [Gun07] *Name and operation main point of morphism blast (maschinelle Übersetzung aus dem Japanischen)*. URL: <http://gunsight.jp/b/1/Gunsight.htm>, 2007. Autoren unbekannt. [hier verwendet auf S. 8]
- [HAG04] Hillers, B.; Aiteanu, D. und Gräser, A.: *Augmented Reality - Helmet for the Manual Welding Process*, 2004.  
[hier verwendet auf S. 30]
- [Har06] Hart, Sandra G.: *Nasa-Task Load Index (Nasa-TLX); 20 Years Later*. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, 50:904–908, 2006. [hier verwendet auf S. 67]
- [Hay97] Hayter, Roger: *The Dynamics of Industrial Location: The Factory, The Firm and The Production System*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 1. Auflage, 1997. [hier verwendet auf S. 1]
- [HC96] Howarth, P. A. und Costello, P. J.: *The Nauseogenicity of Using a Head-Mounted Display, Configured as a Personal Viewing System, for an Hour*. In: *Proceedings of the Second FIVE International Conference*, 1996. [hier verwendet auf S. 46]

- [Her01] Hermann, Martin: *Numerische Mathematik*. Oldenbourg, München, Wien, 2001. [hier verwendet auf S. 25]
- [HF04] Höllerer, Tobias und Feiner, Steve: *Mobile augmented reality*. In: Karimi, H. und Hammad, A. (Herausgeber): *Telegeoinformatics: Location-Based Computing and Services*. Taylor and Francis Books Ltd., London, UK, 2004. [hier verwendet auf S. 30]
- [HFT<sup>+</sup>99] Hollerer, T.; Feiner, S.; Terauchi, T.; Rashid, G. und Hallaway, D.: *Exploring MARS: Developing indoor and outdoor user interfaces to a mobile augmented reality system*. *Computers and Graphics*, 23:779–785, 1999. [hier verwendet auf S. 43]
- [HGR08] Hofmann, Peter; Gude, Dietmar und Rinkenauer, Gerhard: *Einflüsse der Dimensionalität der Informationsdarstellung im Head-Up-Display auf die Fahrleistung*. In: Grandt, Morten und Bauch, Anna (Herausgeber): *Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration*, Seiten 217–231. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e.V., 2008. [hier verwendet auf S. 78]
- [HLDHR03] Hamza-Lup, Felix G.; Davis, Larry; Hughes, Charles E. und Rolland, Jannick P.: *Computer-based Distributed Collaborative Environments*. Technischer Bericht, ACM / Crossroads / Xrds9-3, 2003. <http://www.acm.org/crossroads/xrds9-3/dare.html>. [hier verwendet auf S. 64 und 94]
- [Hom09] Hom, James: *The Usability Methods Toolbox*. <http://jthom.best.vwh.net/usability/>, Stand 11.01.2009, 2009. [hier verwendet auf S. 43]
- [Hor03] Horn, A.: *Diagnostik der Herzfrequenzvariabilität in der Sportmedizin*. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Sportmedizin, 2003. [hier verwendet auf S. 68]
- [HSHS05] Hughes, Charles E.; Stapleton, Christopher B.; Hughes, Darin E. und Smith, Eileen M.: *Mixed Reality in Education, Entertainment, and Training*. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(6):24–30, 2005. [hier verwendet auf S. 31]
- [HSK<sup>+</sup>08] Ho, H.; Saeedi, E.; Kim, S. S.; Shen, T. T. und Parviz, B. A.: *Contact lens with integrated inorganic semiconductor devices*. In: *IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Seiten 403–406, Tucson, AZ, 2008. IEEE Press. [hier verwendet auf S. 39]
- [HTM<sup>+</sup>96] Hoshi, Hiroaki; Taniguchi, Naosato; Morishima, Hideki; Akiyama, Takeshi; Yamazaki, Shouichi und Okuyama, Atsushi: *Off-axial HMD optical system consisting of aspherical surfaces without rational symmetry*. In: *Proceedings of the SPIE Volume 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*, Seiten 234–242, 1996. [hier verwendet auf S. 39]
- [HU07a] Heinath, Marcus und Urbas, Leon: *HTAmap - Von der Aufgabenanalyse zum kognitiven Modell*. In: *Prospektive Gestaltung*

von Mensch-Technik-Interaktion, 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme 10. bis 12. Oktober 2007, Band 22 der Reihe *Fortschritt-Berichte*, Düsseldorf, 2007. VDI Verlag GmbH.  
[hier verwendet auf S. 53]

- [HU07b] Huckauf, Anke und Urbina, Mario: *Gaze communication: The case of object selection*. In: *European Conference on Eye Movements (ECEM) 14*, 2007. [hier verwendet auf S. 46]
- [Hua03] Hua, Hong: *Development of Head-Mounted Projective Display and Its Application for Collaborative Environments*. Technischer Bericht, NSF Robotics and Computer Vision 03 Workshop, 2003. [hier verwendet auf S. 18]
- [HUD<sup>+</sup>08] Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Doil, Fabian; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Distribution of Visual Attention in Head-worn Displays*. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualisation 2008 (APGV08)*, Los Angeles, California, USA, 2008. ACM.  
[hier verwendet auf S. 21, 71 und 125]
- [HUT<sup>+</sup>08] Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger und Doil, Fabian: *Visual Search in Head-up Displays*. In: *Perception, European Conference on Visual Perception ECVP*, 2008. [hier verwendet auf S. 125]
- [HZ04] Hartley, Richard I. und Zisserman, Andrew: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2. Auflage, 2004. [hier verwendet auf S. 25, 26, 100 und XXXI]
- [Int08] InterSense Inc.: *Bedford, MA, U.S.A.* URL: <http://www.isense.com/>, 2008. [hier verwendet auf S. 14]
- [IRC04] Ieronutti, Lucio; Ranon, Roberto und Chittaro, Luca: *Automatic derivation of electronic maps from X3D/VRML worlds*. In: *Web3D '04: Proceedings of the ninth international conference on 3D Web technology*, Seiten 61–70, New York, NY, USA, 2004. ACM. [hier verwendet auf S. 42]
- [JBK<sup>+</sup>04] Jacko, Julie A.; Barnard, Leon; Kongnakorn, Thitima; Moloney, Kevin P.; Edwards, Paula J.; Emery, V. Kathlene und Sainfort, Francois: *Isolating the effects of visual impairment: exploring the effect of AMD on the utility of multimodal feedback*. In: *CHI '04: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Seiten 311–318, New York, NY, USA, 2004. ACM. [hier verwendet auf S. 45]
- [JBL<sup>+</sup>00] Julier, Simon; Baillot, Yohan; Lanzagorta, Marco; Brown, Dennis und Rosenblum, Lawrence: *BARS: Battlefield Augmented Reality System*. In: *In NATO Symposium on Information Processing Techniques for Military Systems*, Seiten 9–11, 2000.  
[hier verwendet auf S. 32]
- [Kas08] Kastsian, Martin: *Genauigkeit Mobiler Augmented Reality Systeme - Untersuchungen am Referenzarbeitsplatz*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für technische und



betriebliche Informationssysteme; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2008.  
[hier verwendet auf S. 99 und LV]

- [KDB<sup>+</sup>02] Klinker, Gudrun; Dutoit, Allen H.; Bauer, Martin; Bayer, Johannes; Novak, Vinko und Matzke, Dietmar: *Fata Morgana - A Presentation System for Product Design*. In: *Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 76–85, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 31]
- [KFTM07] Katus, Tobias; Filippis, Monica De; Thüring, Manfred und Mohs, Carsten: *Indikatoren für Beanspruchung im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktionsforschung*. In: *Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion, 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme 10. bis 12. Oktober 2007*, Band 22 der Reihe *Fortschritt-Berichte*, Seiten 347–350, Düsseldorf, 2007. VDI Verlag GmbH. [hier verwendet auf S. 51]
- [Kim08] Kim, Arnold: *Apple Researching Laser-Based Head Mounted Display*. MacRumors, 2008. URL: <http://www.macrumors.com/2008/04/17/apple-researching-laser-based-head-mounted-display/>, Stand: 17.04.2008. [hier verwendet auf S. 39]
- [Kip07] Kipp, Alexander: *Visuelle Odometrie - Bildgestützte Bestimmung der Eigenbewegung über Grund*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Fakultät für Informatik, 2007. [hier verwendet auf S. 118]
- [Kiy07] Kiyokawa, Kiyoshi: *A Wide Field-of-view Head Mounted Projective Display Using Hyperbolic Half-silvered Mirrors*. In: *Proceedings of the 6th IEEE and ACM international symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 207–210, Los Alamitos, CA, USA, 2007. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 39]
- [KM06] Kähäri, Markus und Murphy, David J.: *MARA - Sensor Based Augmented Reality System for Mobile Imaging*. In: *5th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2006. [hier verwendet auf S. 32]
- [KM07] Klein, Georg und Murray, David: *Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces*. In: *Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Washington, DC, USA, November 2007. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 33]
- [Kra94] Kraus, Karl: *Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren*, Band 1. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn, 5. Auflage, 1994. [hier verwendet auf S. 117]
- [KT95] Kocian, D. F. und Task, H. L.: *Visually coupled systems hardware and the human interface*. In: Barfield, W. und Furness, T. A. (Herausgeber): *Virtual environments and advanced interface design*, Seiten 175–256, New York, 1995. Oxford University Press. [hier verwendet auf S. L]



- [KTEU00] Kasai, I.; Tanijiri, Y.; Endo, T. und Ueda, H.: *A forgettable near eye display*. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers*, Seiten 115–118, Los Alamitos, 2000. IEEE Computer Society Press. [hier verwendet auf S. 33 und 37]
- [Lan07] *Langenscheidt Fremdwörterbuch Online*. URL: <http://services.langenscheidt.de/fremdwb/fremdwb.html>, 2007. Langenscheidt KG, Berlin und München, Stand: 25.04.2007. [hier verwendet auf S. 11]
- [Lan08] Lange, Barbara: *Intelligente Kleidung: Textil als Grundlage für elektronische Schaltungen - Sensorweste meldet Stress*. VDI Nachrichten, (30):7, 2008. [hier verwendet auf S. 46]
- [Lau09] Lau, Oliver: *Faites vos jeux! c't Magazin für Computertechnik*, (2):172, 2009. [hier verwendet auf S. 83]
- [LBS09] Livingston, Mark A.; Barrow, Jane H. und Sibley, Ciara M.: *Quantification of Contrast Sensitivity and Color Perception using Head-worn Augmented Reality Displays*. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality (VR2009)*, Seiten 115–122, Lafayette, USA, 2009. IEEE Press. [hier verwendet auf S. 46]
- [LCH08] Liu, Sheng; Cheng, Dewen und Hua, Hong: *An Optical See-Through Head Mounted Display with Addressable Focal Planes*. In: *Proceedings of the Seventh IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008*, Seiten 33–42, Cambridge, UK, 2008. IEEE Press. [hier verwendet auf S. 33, 39 und 46]
- [Liv06] Livingston, Mark A.: *Quantification of Visual Capabilities using Augmented Reality Displays*. In: *IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 3–12, 2006. [hier verwendet auf S. 46]
- [LK03] Loomis, J. M. und Knapp, J. M.: *Visual perception of egocentric distance in real and virtual environments*. In: *Virtual and Adaptive Environments*, Seiten 21–46. Erlbaum, Hillsdale, NJ, USA, 2003. [hier verwendet auf S. 46]
- [Lö199] Löllgen, Herbert: *Neue Methoden in der kardialen Funktionsdiagnostik*. Deutsches Ärzteblatt, 96(9):1638 – 1641, 1999. [hier verwendet auf S. XXXII]
- [Lol02] Lolling, Andreas: *Laborversuche zur Analyse von menschlichen Fehlern in der Kommissionierung*. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, Nummer 56 1-2, Seiten 80–92, Darmstadt, Dortmund, 2002. Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. [hier verwendet auf S. 56]
- [LRWP05] Luo, G.; Rensing, N. M.; Weststrate, E. und Peli, E.: *Registration of an on-axis see-through head-mounted display and camera system*. *Optical Engineering*, 44:4002, feb 2005. [hier verwendet auf S. 22 und 40]

- [LT04] Leykin, Alex und Tuceryan, Mihran: *Automatic Determination of Text Readability over Textured Backgrounds for Augmented Reality Systems*. In: *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 224–230, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 73 und 74]
- [Luh03] Luhmann, Thomas: *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann, Heidelberg, 2003. [hier verwendet auf S. 24]
- [Mai94] Maier, Peter Herbert: *Räumliches Vorstellungsvermögen - Komponenten, geschlechtsspezifische Differenzen, Relevanz, Entwicklung und Realisierung in der Realschule*. Europäische Hochschulschriften, Reihe 6, Psychologie Vol. 493, 1994. [hier verwendet auf S. 41]
- [Mai07] Maier, T.: *Seniorenrechtliches Multi-Media-Interface für ein Fahrzeug - Nur für Senioren oder für alle Fahrer geeignet?* In: Rötting, Matthias; Wozny, Günther; Klostermann, Anne und Huss, Jörg (Herausgeber): *Prospektive Gestaltung von Mensch-Technik-Interaktion - 7. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, Nummer 25 in 22, Düsseldorf, 2007. VDI Verlag. [hier verwendet auf S. 45]
- [MAT07] MATRIS, Projekt: *Markerless real-time Tracking for Augmented Reality Image Synthesis*. URL: <http://www.ist-matris.org/>, 2007. [hier verwendet auf S. 14]
- [MC99] Milgram, P. und Colquhoun, H.: *A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration*. In: Ohta, Y. und Tamura, H. (Herausgeber): *Mixed Reality - Merging Real and Virtual Worlds*. Springer Verlag, Berlin, 1999. [hier verwendet auf S. 7]
- [Mee01] Meehan, J. W.: *Advanced Display Technologies: What have we lost*. Human Systems IAC Gateway, XII(3), 2001. [hier verwendet auf S. 46]
- [Men01] Menozzi, Marino: *Human Factors in „Augmented Reality“: Nutzbarkeit der Knotenpunktabbildung im „Virtual Retinal Display“*. Technischer Bericht, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 2001. [hier verwendet auf S. 33]
- [Met08] *Webseite der metaio. Augmented Solutions GmbH*. URL: <http://www.metaio.com/>, 2008. Stand: 11.10.2008. [hier verwendet auf S. 31]
- [Miz01] Mizell, David: *Boeing's wire bundle assembly project*. In: Barfield, Woodrow und Caudell, Thomas (Herausgeber): *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, Seiten 447–467. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2001. [hier verwendet auf S. 7, 8, 28 und 29]
- [MMT<sup>+</sup>08] Miyashita, T.; Meier, P.; Tachikawa, T.; Orlic, S.; Eble, T.; Scholz, V.; Gapel, A.; Gerl, O.; Arnaudov s. und Lieberknecht,

- S.: *An Augmented Reality museum guide*. In: *7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 103–106, 2008. [hier verwendet auf S. 32 und 47]
- [Moi03] Moise, Adrian: *Designing Better User Interfaces For Radiology Interpretation*. Dissertation, Simon Fraser University, Burnaby, B.C., Canada, 2003. [hier verwendet auf S. 67]
- [Mor02] Moré, John: *Direkte Lineare Transformation*. Technischer Bericht, TU Berlin, 2002. URL: <http://www.fpk.tu-berlin.de/~john/pdf/dlt.pdf>. [hier verwendet auf S. 24]
- [MSG07] Mößmer, H. E.; Schedlbauer, M. und Günthner, W. A.: *Die automobile Welt im Umbruch*. In: Günthner, Willibald A. (Herausgeber): *Neue Wege in der Automobillogistik - Die Vision der Supra-Adaptivität*, Seiten 3–15. Springer Berlin Heidelberg, 2007. [hier verwendet auf S. 1]
- [MT99] McGarrity, Erin und Tuceryan, Mihran: *A Method for Calibrating See-Through Head-Mounted Displays for AR*. In: *IWAR '99: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*, Seite 75, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 39, 40 und 117]
- [NESN02] Nickel, Peter; Eilers, Karin; Seehase, Liane und Nachreiner, Friedhelm: *Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenz- und Herzfrequenzvariabilitätsmaßen als Indikatoren psychischer Beanspruchung*. *Z Arb Wiss*, (56):22–36, 2002. [hier verwendet auf S. 69]
- [Nez05] Nezu, Tadashi: *Olympus Prototypes Head Mount Display Wearable Any Time*. TechOn!, 2005. URL: <http://techon.nikkeibp.co.jp/english/>, Stand: 06.06.2005. [hier verwendet auf S. 39]
- [Nit76] Nitsch, J. R.: *Die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) - Ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Befindlichkeitsskalierung*. In: J. R. Nitsch, I. Udris (Herausgeber): *Beanspruchung im Sport. Beiträge zur psychologischen Analyse sportlicher Leistungssituationen*, Seiten 81–102, Bad Homburg, Germany, 1976. Limpert. [hier verwendet auf S. 66, 67 und XXX]
- [NSB<sup>+</sup>06] Newman, Joseph; Schall, Gerhard; Barakonyi, Istvan; Schürzinger, Andreas und Schmalstieg, Dieter: *Wide-Area Tracking Tools for Augmented Reality*. In: *Advances in Pervasive Computing*, Seiten 143–146. Verlag Oesterreichische Computer-Gesellschaft, 2006. [hier verwendet auf S. 33]
- [Oeh04] Oehme, Olaf: *Ergonomische Untersuchungen von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service*. Dissertation, RWTH Aachen, 2004. Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Bd. 61. Aachen: Shaker Verlag. [hier verwendet auf S. 35, 37 und 46]
- [OMN<sup>+</sup>08] Odenthal, Barbara; Mayer, Marcel Ph.; Neuhöfer, Jan; Kausch, Bernhard und Schlick, Christopher M.: *Fehleridentifikation in der robotergestützten Montage mit Hilfe synthetischer Sichtsysteme*. In: Grandt, Morten und Bauch, Anna (Herausgeber):

*Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration*, Seiten 247–260. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e.V., 2008. [hier verwendet auf S. 43, 57 und 58]

- [OSL02] Oehme, Olaf; Schmidt, Ludger und Luczak, Holger: *Comparison between the Strain Indicator HRV of a Head Based Virtual Retinal Display and LC-Mounted Displays for Augmented Reality*. In: *Proceedings of the Conference WWDU 2002 World Wide Work - 2002*, Seiten 387–389, Berchtesgaden, 2002. Abingdon, Oxon, UK : Taylor & Francis. [hier verwendet auf S. 35 und 68]
- [Ota08] Otani, Takuya: *Brother Industries Develops Head-mountable Retinal Scanning Display*. TechOn!, 2008. URL: <http://technikkeibp.co.jp/english/>, Stand: 06.05.2008. [hier verwendet auf S. 39]
- [OZTX04] Owen, Charles B.; Zhou, Ji; Tang, Arthur und Xiao, Fan: *Display-Relative Calibration for Optical See-Through Head-Mounted Displays*. In: *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 70–78, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 40]
- [PB89] Potter, Scott S. und Bressler, Jeine R.: *Subjective Workload Assessment Technique (SWAT): A User's Guide*. Technischer Bericht, Systems Research Labs Inc., Dayton, OH, USA, 1989. [hier verwendet auf S. 67]
- [PBDM07] Pentenrieder, Katharina; Bade, Christian; Doil, Fabian und Meier, Peter: *Augmented Reality-based factory planning - an application tailored to industrial needs*. In: *Proceedings of the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 11 und 31]
- [PBS<sup>+</sup>07] Pfister, E. A.; Böckelmann, I.; Seibt, R.; Stoll, R. und Weippert, M.: *Arbeitsmedizinische Bedeutung der Herzfrequenzvariabilität*. In: *ErgoMed*, 2007. [hier verwendet auf S. 68 und 82]
- [Pen09] Pentenrieder, Katharina: *Augmented Reality based Factory Planning*. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin und Augmented Reality, 2009. [hier verwendet auf S. 100, 104 und 116]
- [Pfe08] Pfeiffer, Martin: *Entwicklung und Umsetzung eines Lokalisierungs- und Navigationskonzeptes für einen Augmented Reality gestützten Referenzarbeitsplatz*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für technische und betriebliche Informationssysteme; Volkswagen AG Wolfsburg; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2008. [hier verwendet auf S. 13 und LV]
- [Pfi08] Pfister, Eberhard A.: *Arbeitsmedizin von A bis Z*. Universum Verlag GmbH, Wiesbaden, 2008. [hier verwendet auf S. 48 und 68]

- [PNYT<sup>+</sup>05] Pang, Y.; Nee, Andrew Y. C.; Youcef-Toumi, Kamal; Ong, S. K. und Yuan, M. L.: *Assembly Design and Evaluation in an Augmented Reality Environment*. Innovation in Manufacturing Systems and Technology, 2005. [hier verwendet auf S. 31]
- [PRS06] Pfister, E. A.; Rüdiger, H. und Scheuch, K.: *Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin*. Technischer Bericht, Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 2006. [hier verwendet auf S. 69]
- [PST04] Piekarski, Wayne; Smith, Ross und Thomas, Bruce H.: *Designing Backpacks for High Fidelity Mobile Outdoor Augmented Reality*. In: *Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 280–281, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 30 und 78]
- [PWS05] Pfendler, Claudius; Widdel, Heino und Schlick, Christopher: *Bewertung eines Head-Mounted- und eines Hand-Held Displays bei einer Zielerkennungsaufgabe*. Z. ARB. WISS., (59):13–21, 2005. [hier verwendet auf S. 44, 51 und 93]
- [RBH03] Rügge, Ingrid; Boronowsky, Michael und Herzog, Otthein: *Wearable Computing für die Industrie*. Industrie-Management - Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse, 6:25–28, 2003. [hier verwendet auf S. 12]
- [RBHL<sup>+</sup>05] Rolland, Jannick P.; Biocca, Frank; Hamza-Lup, Felix; Ha, Yanggang und Martins, Ricardo: *Development of head-mounted projection displays for distributed, collaborative, augmented reality applications*. Presence: Teleoper. Virtual Environ., 14(5):528–549, 2005. [hier verwendet auf S. 39]
- [Rüd05] Rüdiger, Ulrich: *Algorithmik III - Algorithmen und Datenstrukturen für kontinuierliche Modelle*. URL: <http://www10.informatik.uni-erlangen.de/Teaching/Courses/SS2005/AlgoIII/Folien/Algo3%202.pdf>, 2005. Stand: 06.08.2007. [hier verwendet auf S. 25]
- [Reg06] Regenbrecht, Holger: *Industrial Augmented Reality Applications: Case studies of Augmented Reality applications*. Technischer Bericht, University of Otago, Information Science, 2006. [hier verwendet auf S. 33]
- [REZ07] Reinhart, G.; Eursch, Andreas und Zeilinger, T.: *Augmented Reality-Unterstützung für die Produktion von radioaktiven Stoffen in abgeschirmten Handschuhboxen*. In: Gausemeier, Jürgen und Grafe, Michael (Herausgeber): *Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, Band 6, Seiten 129–144. HNI-Verlagsschriftenreihe, 2007. [hier verwendet auf S. 10]
- [RH05] Rash, Clarence E. und Hiatt, Keith L.: *Apache Flight Experience in Operation Iraqi Freedom (OIF) shows reduced incidents of visual illusions and problems with the monocular helmet-mounted display*. In: *61st Annual Forum and Technology Display*, Grapevine, TX, USA, 2005. The Vertical Flight Society. [hier verwendet auf S. 46]

- [RJM<sup>+</sup>07] Ranzinger, Monika; Junghanns, Sebastian; Mendez, Erick; Schall, Gerhard und Schmalstieg, Dieter: *Augmented Reality in der Leitungsdokumentation*. 12. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, 2007. München.  
[hier verwendet auf S. 12 und 32]
- [RK04] Richter, K. F. und Klippel, A.: *You-Are-Here Maps: Wayfinding Support as Location Based Service*. Technischer Bericht, Universität Hamburg, 2004. [hier verwendet auf S. 42]
- [RM02] Reuss, Elke und Menozzi, Marino: *AR for Mobile Healthcare Information Systems : Do Display Units Take Human Factors into Consideration?* In: *Proceedings of the Conference WW-DU 2002 World Wide Work - 2002*, Seiten 390–392, Berchtesgaden, 2002. Abingdon, Oxon, UK : Taylor & Francis.  
[hier verwendet auf S. 46]
- [RM03] Robertson, Cindy und MacIntyre, Blair: *Adapting to Registration Error in an Intent-Based Augmentation System*. In: Ong, S. K. und Nee, A. Y. C. (Herausgeber): *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*, London, UK, 2003. Springer Verlag. [hier verwendet auf S. 14, 22 und 99]
- [Rob07] Robertson, Cindy M.: *Using graphical context to reduce the effects of registration error in augmented reality*. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2007.  
[hier verwendet auf S. 112]
- [RP97] Rasmussen, Jens und Pejtersen, Annelise Mark: *Ecological Information Systems and Support of Learning: Coupling the Work Domain Information to the User Characteristics*. In: Helander, Martin; Landauer, Thomas K. und Prabhu, Prasad V. (Herausgeber): *Handbook of Human-Computer Interaction*, Band 2. North-Holland Publishing Co, Amsterdam, Niederlande, 1997.  
[hier verwendet auf S. 55]
- [RS03] Reitmayr, Gerhard und Schmalstieg, Dieter: *Location based applications for mobile augmented reality*. In: *AUIC '03: Proceedings of the Fourth Australasian user interface conference on User interfaces 2003*, Seiten 65–73, Darlinghurst, Australia, 2003. Australian Computer Society, Inc. [hier verwendet auf S. 43]
- [RS04] Reitmayr, G. und Schmalstieg, D.: *Collaborative Augmented Reality for Outdoor Navigation and Information Browsing*. In: *Symposium Location Based Services and TeleCartograph*, Seite 31, 2004. [hier verwendet auf S. 42 und 43]
- [SB07] Schmeil, Andreas und Broll, Wolfgang: *MARA - A Mobile Augmented Reality-Based Virtual Assistant*. In: *IEEE Virtual Reality Conference 07*, Seiten 267–270, 2007. [hier verwendet auf S. 11]
- [Sch01] Schröter, Welf: *Multimedia Arbeitsplatz der Zukunft (MAP21) - Basispapier 2, Annahmen über Folgewirkungen und soziale Ausgestaltungen*. URL: [http://www.map21.de/projekt/arbeit21/a21\\_basispapier-02.pdf](http://www.map21.de/projekt/arbeit21/a21_basispapier-02.pdf), 2001. (Stand 14.02.2009).  
[hier verwendet auf S. 11]



- [Sch05a] Schmidt, Ludger: *Mobile Mixed-Reality-Anwendungen benutzerorientiert gestalten*. In: Urbas, Leon und Steffens, Christiane (Herausgeber): *Zustandserkennung und Systemgestaltung. 6. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme.*, Band 22 der Reihe 22, Seiten 89–94, Düsseldorf, 2005. VDI Verlag. [hier verwendet auf S. 11]
- [Sch05b] Schreer, Oliver: *Stereoanalyse und Bildsynthese*. Springer Berlin Heidelberg, 2005. [hier verwendet auf S. 26]
- [Sch06a] Scheuch, Klaus (Herausgeber): *Arbeitsmedizin heute - Konzepte für Morgen*. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) e.V., 2006. [hier verwendet auf S. 48 und 70]
- [Sch06b] Schimmel, Tanja: *Einsatz von Augmented Reality im Bereich der Störkantenanalyse in der Fabrikplanung*. Diplomarbeit, Fachhochschule der Wirtschaft Gütersloh, Volkswagen AG Wolfsburg, 2006. [hier verwendet auf S. 31]
- [Sch07] Scharf, Christian: *Untersuchung geeigneter Informationsdarstellungen für mobile Augmented Reality in industriellen Anwendungen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für technische und betriebliche Informationssysteme; Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2007. [hier verwendet auf S. LV]
- [Sch08] Schreiber, Werner: *Angewandte virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus AVILUS*. In: *Ta-gungsband der 11. IFF Wissenschaftstage: Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. VR und AR - Automotive*, Seiten 133–140, 2008. [hier verwendet auf S. 2, 30, 33 und 125]
- [Sch09] Schmalstieg, Dieter: *Effective Visual Communication in Augmented Reality*. Invited talk, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, 2009. [hier verwendet auf S. 16]
- [SCP95] Stoakley, Richard; Conway, Matthew J. und Pausch, Randy: *Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature*. In: *CHI '95: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Seiten 265–272, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. [hier verwendet auf S. 42]
- [SCZ05] Sun, Ron; Coward, Andrew L. und Zenzen, Michael J.: *On Levels of Cognitive Modeling*. *Philosophical Psychology*, 18(5):613–637, 2005. [hier verwendet auf S. 53]
- [SFPK06] Schwerdtfeger, Björn; Frimor, Troels; Pustka, Daniel und Klinker, Gudrun: *Mobile Information Presentation Schemes for Logistics Applications*. In: *16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2006)*, Hangzhou, VR China, 2006. Zhejiang University of Technology. [hier verwendet auf S. 41, 43, 46 und 91]

- [SG05] Swan, J. Edward II und Gabbard, Joseph L.: *Survey of User-Based Experimentation in Augmented Reality*. In: *Proceedings 1st International Conference on Virtual Reality*, Las Vegas, USA, 2005. [hier verwendet auf S. 44]
- [SGSM07] Santos, Pedro; Gierlinger, Thomas; Stork, Andre und McIntyre, Don: *Display and Rendering Technologies for Virtual and Mixed Reality Design Review*. In: *7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 2007. [hier verwendet auf S. 38]
- [SGW<sup>+</sup>01] Seibel, E. J.; Gau, C. C.; Weghorst, S. McQuaide S. J.; Kelly, J. P. und Furness, T.A. III: *Augmented retinal light scanning display for low vision: effect of text color and background on reading performance*. In: *Proceedings of Optical Society of America's Topical Meeting on Vision Science and Its Applications*, Seiten 51–54, 2001. [hier verwendet auf S. 46]
- [SH06] Smith, Shamus P. und Hart, Jonathan: *Evaluating Distributed Cognitive Resources for Wayfinding in a Desktop Virtual Environment*. In: *VR '06: Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, Seite 115, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 46]
- [SK08] Schwerdtfeger, Björn und Klinker, Gudrun: *Supporting Order Picking with Augmented Reality*. In: *Proc. of the seventh IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented reality*, 2008. [hier verwendet auf S. 24 und 46]
- [SLW02] Splechtna, Rainer C.; L.Fuhrmann, Anton und Wegenkittl, Rainer: *ARAS - Augmented Reality Aided Surgery System Description*. Technischer Bericht, VRVis Research Center, Austria, www.vrvis.at, 2002. TR-VRVis-2002-040. [hier verwendet auf S. 32]
- [SMM<sup>+</sup>08] Schoor, Wolfram; Masik, Steffen; Mecke, Rüdiger; Seiffert, Udo und Schenk, Michael: *Visualizing and Exploring Barley Grain Models in VR with the Elbe Dom Immersive Laser Projection System*. In: *Proceedings of 10th Virtual Reality International Conference*, Seiten 217–224, 2008. [hier verwendet auf S. 75]
- [SRM<sup>+</sup>07] Schall, G.; Reitinger, B.; Mendez, E.; Junghanns, S. und Schmalstieg, D.: *Handheld Geospatial Augmented Reality Using Urban 3D Models*. In: *Proceedings of the Workshop on Mobile Spatial Interaction, ACM International Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2007. [hier verwendet auf S. 32]
- [SSH08] Sachs, Gottfried; Schuck, Falko und Holzapfel, Florian: *Dreidimensionale Flugführungsanzeigen zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion*. In: Grandt, Morten und Bauch, Anna (Herausgeber): *Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration*, Seiten 201–215. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt Lilienthal-Oberth e.V., 2008. [hier verwendet auf S. 91]

- [Sta06] Staub, Guido M.: *Navigation mit mobilen Augmented Reality Systemen im Gelände*. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2006. [hier verwendet auf S. 32]
- [Sut65] Sutherland, I. E.: *The ultimate display*. In: *Proceedings of the IFIP Congress 2*, Seiten 506–508, 1965. [hier verwendet auf S. 35]
- [Sut06] Suthau, Tim: *Positionsgenaue Einblendung räumlicher Informationen in einem See Through Head Mounted Display für die Medizin am Beispiel der Leberchirurgie*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006. [hier verwendet auf S. 25, 33 und 40]
- [SW08] Schmalstieg, Dieter und Wagner, Daniel: *Mobile Phones as a Platform for Augmented Reality*. In: *Proceedings of the IEEE VR 2008 Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems*, Seiten 43–44. Shaker Publishing, 2008. [hier verwendet auf S. 15, 32 und 33]
- [Tal97] Talbert, Nancy: *Toward Human-Centered Systems*. IEEE Comput. Graph. Appl., 17(4):21–28, 1997. [hier verwendet auf S. 45]
- [Tas96] Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology: *Heart rate variability - Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use*. Eur Heart J., 17:354–381, 1996. [hier verwendet auf S. 69]
- [Tay11] Taylor, Frederick Winslow: *The Principles of Scientific Management*. New York, 1911. deutsch: *Die Grundsätze der wissenschaftlichen Betriebsführung*, Berlin, München, 1912. [hier verwendet auf S. 1]
- [TCG<sup>+</sup>08] Takacs, Gabriel; Chandrasekhar, Vijay; Gelfand, Natasha; Xiong, Yingen; Chen, Wei C.; Bismpiagiannis, Thanos; Grzeszczuk, Radek; Pulli, Kari und Girod, Bernd: *Outdoors augmented reality on mobile phone using loxel-based visual feature organization*. In: *Proceeding of the 1st ACM international conference on Multimedia information retrieval*, Seiten 427–434, New York, NY, 2008. ACM. [hier verwendet auf S. 32]
- [Teg07] Tegtmeier, André: *Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie*. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, 2007. [hier verwendet auf S. 11 und 33]
- [TGN02] Tuceryan, Mihran; Genc, Yakup und Navab, Nassir: *Single-Point active alignment method (SPAAM) for optical see-through HMD calibration for augmented reality*. Presence: Teleoper. Virtual Environ., 11(3):259–276, 2002. [hier verwendet auf S. 22, 24, 39, 40, 97, 109, 115 und 117]
- [tHS04] Hompel, M. ten und Schmidt, T.: *Warehouse Management*. Springer, Berlin, 2004. [hier verwendet auf S. 43 und 89]
- [Tüm05] Tümler, Johannes: *Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der „Augmented Reality“-Technologie im Bereich Kommissionierung*. Unveröffentlichte Studienarbeit, Volkswagen AG

- Wolfsburg, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2005.  
[hier verwendet auf S. 2, 7, 35 und 56]
- [Tüm06] Tümler, Johannes: *Realisierung eines Augmented Reality basierten Kommissioniersystems für einen Referenzarbeitsplatz*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Volkswagen AG Wolfsburg, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2006.  
[hier verwendet auf S. 2, 15 und 60]
- [TMS<sup>+</sup>08] Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Schenk, Michael; Huckauf, Anke; Doil, Fabian; Paul, Georg; Pfister, Eberhard A.; Böckelmann, Irina und Roggentin, Anja: *Mobile Augmented Reality in Industrial Applications: Approaches for Solution of User-Related Issues*. In: *Proceedings of the Seventh IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 87–90, Cambridge, UK, 2008. IEEE Press.  
[hier verwendet auf S. 92]
- [TMX07] Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger und Xu, Jian: *See-Through Kalibrierverfahren für mobile Augmented Reality Assistenzsysteme*. In: Gausemeier, Jürgen und Grafe, Michael (Herausgeber): *Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, Band 6, Seiten 233–247. HNI-Verlagsschriftenreihe, 2007. [hier verwendet auf S. 11]
- [TNG07] *TN Games Website, Produkt: 3rdSpace@Vest*. URL: <http://www.tngames.com/products.php>, 2007. Stand 22.10.2007.  
[hier verwendet auf S. 7]
- [TOBM03] Tang, Arthur; Owen, Charles; Biocca, Frank und Mou, Weimin: *Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly*. In: *CHI '03: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Seiten 73–80, New York, NY, USA, 2003. ACM Press. [hier verwendet auf S. 2, 31, 42, 46 und 57]
- [TOBM04] Tang, Arthur; Owen, Charles; Biocca, Frank und Mou, Weimin: *Performance evaluation of augmented reality for directed assembly*. In: Ong, S. K. und Nee, A. Y. C. (Herausgeber): *Virtual and augmented reality applications in manufacturing*, Seiten 301–322, Berlin, Germany, 2004. Springer Verlag.  
[hier verwendet auf S. 3, 45 und 57]
- [TSBM08] Tümler, Johannes; Sauer, Steffen; Berndt, Dirk und Mecke, Rüdiger: *Bildverarbeitung und Augmented Reality für industrielle Anwendungen*. In: *Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, Band 7, HNI-Verlagsschriftenreihe, 2008. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn. [hier verwendet auf S. 23, 31 und 57]
- [TSLB05] Tönnis, Marcus; Sandor, Christian; Lange, Christian und Bubb, Heiner: *Experimental Evaluation of an Augmented Reality Visualization for Directing a Car Driver's Attention*. In: *Proceedings of the Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 56–59, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.  
[hier verwendet auf S. 43, 46 und 73]

- [TSM<sup>+</sup>08] Tümler, Johannes; Scharf, Christian; Mecke, Rüdiger; Paul, Georg und Schenk, Michael: *Incorporating User Preference to Represent Information for Manual Work Supported by Augmented Reality*. In: *Proceedings of X Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR 2008)*, Joao Pessoa, Brazil, 2008. [hier verwendet auf S. 46 und 73]
- [TZO03] Tang, Arthur; Zhou, Ji und Owen, Charles: *Evaluation of Calibration Procedures for Optical See-Through Head-Mounted Displays*. In: *Proceedings of the The 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seite 161, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 40, 97, 102, 109 und 114]
- [Ull06] Ullmann, Christine: *Nutzerakzeptanz von Augmented Reality - Eine Fallstudie zum Vollschichteneinsatz in der Automobilproduktion*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Hamburg, 2006. [hier verwendet auf S. 3, 15, 33, 44 und 46]
- [Val98] Vallino, James R.: *Interactive Augmented Reality*. Dissertation, University of Rochester, Department of Computer Science, 1998. [hier verwendet auf S. 29]
- [vSM<sup>+</sup>00] v. Amelsvoort, L.; Schouten, E. G.; Maan, A. C.; Swenne, C. A. und Kok, F. J.: *Occupational determinants of heart rate variability*. *Int Arch Occup Environ Health*, 73:255–262, 2000. [hier verwendet auf S. 68]
- [vZK76] Zerssen, D. v. und Koeller, D. M.: *Die Befindlichkeits-Skala, Parallelformen BF-S und BF-S'*. Beltz Test Gesellschaft mbH, Weinheim, 1976. [hier verwendet auf S. 66 und XXX]
- [Wan06] Want, Roy: *Build What You Use*. *IEEE Pervasive Computing*, 5(3):2–3, 2006. [hier verwendet auf S. 46]
- [WCCRT04] Willemsen, P.; Colton, M.; Creem-Regehr, S. und Thompson, W. B.: *The effects of head-mounted display mechanics on distance judgements in virtual environments*. In: *1st Symposium on Applied perception in graphics and visualisation*, Los Angeles, USA, 2004. ACM. [hier verwendet auf S. 46]
- [WF07] Walther-Franks, Benjamin: *Augmented Reality on Hand-helds for Pedestrian Navigation*. Diplomarbeit, Universität Bremen, Bremen, 2007. [hier verwendet auf S. 41]
- [Wie03] Wiedenmaier, Stefan: *Unterstützung manueller Montage durch Augmented Reality-Technologien*. Dissertation, RWTH Aachen, 2003. Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Bd. 58. Aachen: Shaker Verlag. [hier verwendet auf S. 2, 55 und 56]
- [WLF07] White, Sean; Lister, Levi und Feiner, Steven: *Visual Hints for Tangible Gestures in Augmented Reality*. In: *Proceedings of the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 15]

- [WOSL01] Wiedenmaier, Stefan; Oehme, Olaf; Schmidt, Ludger und Luczak, Holger: *Augmented Reality for Assembly Process - An Experimental Evaluation*. In: *Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, Seiten 185–186, New York, USA, 2001. [hier verwendet auf S. 57]
- [WPLS05] Wagner, Daniel; Pintaric, Thomas; Ledermann, Florian und Schmalstieg, Dieter: *Towards Massively Multi-user Augmented Reality on Handheld Devices*. *Pervasive Computing*, Seiten 208–219, 2005. [hier verwendet auf S. 30]
- [WPS04] Wagner, Daniel; Pintaric, Thomas und Schmalstieg, Dieter: *The invisible train: a collaborative handheld augmented reality demonstrator*. In: *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies*, Seite 12, New York, NY, USA, 2004. ACM. [hier verwendet auf S. 15]
- [WS03] Wagner, Daniel und Schmalstieg, Dieter: *First Steps Towards Handheld Augmented Reality*. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers*, Seiten 127–135, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society. [hier verwendet auf S. 33]
- [YSC99] Young, A. L.; Stedman, A. W. und Cook, C. A.: *The potential of augmented reality technology for training support systems*. In: *International Conference on Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres*, Seiten 242–246, Bath, UK, 1999. Institution of Engineering and Technology. [hier verwendet auf S. 8]
- [ZCQY07] Zhou, ZhiYing; Cheok, Adrian David; Qiu, Yan und Yang, Xu-bo: *The Role of 3-D Sound in Human Reaction and Performance in Augmented Reality Environments*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, Band 37-2, Seiten 262–272, 2007. [hier verwendet auf S. 7]
- [ZDB08] Zhou, Feng; Duh, Henry Been Lirn und Billingham, Mark: *Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR*. In: *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Seiten 193–202, 2008. [hier verwendet auf S. 28]
- [Zij93] Zijlstra, R.: *Efficiency in Work Behaviour. A Design Approach for Modern Tools*. Delft University Press, Delft, Niederlande, 1993. [hier verwendet auf S. 67]
- [ZNL00] Zhang, X.; Navab, N. und Liou, S. P.: *E-Commerce direct marketing using augmented reality*. In: *IEEE Int. Conf. on Multimedia and Exposition*, 2000. [hier verwendet auf S. 32]
- [ZOL05] Ziefle, M.; Oehme, O. und Luczak, H.: *Visuelle Information und Leistung bei Head-Mounted Displays mit erweiterter Realität*. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 59(3):331–344, 2005. [hier verwendet auf S. 33]



---

# Abkürzungsverzeichnis

	Seite
AR	Augmented Reality, die Erweiterte Realität ..... 2
AV	Augmented Vision, die Erweiterte visuelle Wahrnehmung ..... 7
BFS	Befindlichkeitsskala nach Zerssen [vZK76] ..... 66
CAD	Computer Aided Engineering ..... 31
DOF	Degrees of Freedom (Freiheitsgrade) ..... 13
EKG	Elektrokardiogramm ..... 68
ESK	Ein-Schritt-Kalibrierung ..... 98
EZ-Skala	Eigenzustandsskala nach Nitsch [Nit76] ..... 66
HMD	Head Mounted Display ..... 9
HRV	Herzratenvariabilität ..... 68
IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung .... 60
MSK	Mehr-Schritt-Kalibrierung ..... 109
OLED	Organic Light-Emitting Diode (organische Leuchtdiode) ..... 37
OST	Optical See-Through ..... 17
RFID	Radio Frequency Identification ..... 58
PDA	Personal Digital Assistant, ein mobiler Kleincomputer ..... 9
PST	Projection See-Through ..... 17
STK	See-Through-Kalibrierung ..... 22
TCP	Transmission Control Protocol ..... 64
UDP	User Datagram Protocol ..... 64
UMPC	Ultra Mobile PC ..... 9
VR	Virtual Reality, die Virtuelle Realität ..... 7
VST	Video See-Through ..... 17
WLAN	Wireless Local Area Network ..... 61
YAH	„You-Are-Here“-Prinzip ..... 42

*AR-System* die Gesamtheit aller Soft- und Hardwareelemente zur Erstellung einer [AR](#)-Anwendung, Seite 12

*Augmented Reality* (AR, erweiterte Realität), bezeichnet eine Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine zur Ergänzung der Wahrnehmung der realen Welt um virtuelle Elemente, Seite 6

*Beanspruchung* entsteht in einem Subjekt / Objekt durch eine äußere Belastung und kennzeichnet die resultierenden Reaktionen innerhalb des Subjektes / Objektes, Seite 3

*Belastung* stellt eine Wirkung von außen auf ein Subjekt / Objekt dar, zum Beispiel die Wirkung von Hitze auf einen Menschen, Seite 4

*Confounder* Störgrößen (z.B. bei einer Versuchsdurchführung), die zu Scheinkorrelationen und somit zu falschen Schlussfolgerungen führen können, Seite 51

*Direkte Lineare Transformation* (DLT, auch „lineare Ausgleichsrechnung“), mathematischer Algorithmus zur Lösung einer Reihe von Variablen aus mehreren Ähnlichkeitsrelationen [[HZ04](#)]; wird häufig im Bereich der Photogrammetrie eingesetzt, zum Beispiel zur Ermittlung von Kameraparametern, Seite 24

*Ein-Schritt-Kalibrierung* (ESK), Durchführungsmethodik der See-Through-Kalibrierung für die Aufnahme von Punktkorrespondenzen in einem einzelnen Schritt; es werden gleichzeitig mindestens sechs 2D- und 3D-Passpunkte in Überlagerung gebracht, Seite 98

*Head Mounted Display* (HMD), ein kopfgetragenes Anzeigesystem, auch als „Datenbrille“ bezeichnet; dient zur Anzeige computergenerierter Informationen im Sichtfeld eines Anwenders, Seite 9

*Herzratenvariabilität* (HRV), bezeichnet die Variabilität der Herzschlagfolge (sichtbar in spontanen Schwankungen der Herzperiodendauern); kann zur objektiven Erfassung des Befindens einer Person genutzt werden [[FPUW06](#)], Seite 68

*Kalibriervolumen* bezeichnet den Raum, der bei der Durchführung der See-Through-Kalibrierung durch die 3D-Eingabewerte / Raumpositionen aufgespannt wird, Seite 98

*Mehr-Schritt-Kalibrierung* (MSK), Durchführungsmethodik der See-Through-Kalibrierung für die Aufnahme von Punktkorrespondenzen in mehreren getrennten Schritten; es werden schrittweise mindestens sechs 2D- und 3D-Passpunkte in Überlagerung gebracht, Seite 109

*Mobile Augmented Reality* beschreibt die situationsgerechte Anzeige rechnergenerierter Informationen auf im Sichtfeld positionierten, vom Benutzer mitführbaren Anzeigegeräten, die die Bearbeitung primärer Arbeitsaufgaben nicht behindern, Seite 12

*Optical-See-Through Head Mounted Display (OST-HMD)*, Variante der HMDs, welches eine direkte Sicht auf die Umwelt gewährt, indem Anwender die Umwelt durch einen halb transparenten Spiegel wahrnehmen können, während über diesen Spiegel gleichzeitig virtuelle Informationen ins Auge projiziert werden, Seite 17

*Passpunkt* Punkt auf einer Fläche oder in einem Raum, dessen Lage in einem Koordinatensystem bekannt ist, Seite 26

*Psychophysiologie* Untersucht Beziehungen zwischen psychologischen und physiologischen Vorgängen des Körpers, Seite 3

*See-Through-Kalibrierung* (STK), Prozess zur Ermittlung von Parametern eines mathematischen Modelles, welches die lagerichtige Verknüpfung von virtuellen und realen Objekten im Auge eines Anwenders beim Einsatz von OST-HMDs ermöglicht, Seite 22

*Signifikanzwert  $p$*  ist ein Indikator dafür, wie wahrscheinlich es ist, ein Ergebnis zu erhalten, dass so extrem ist, wie das erhaltene, und zwar unter der Voraussetzung, dass die zuvor getroffene Annahme (Nullhypothese) zutrifft, Seite 77

*Singulärwertzerlegung* mathematisches Verfahren zur Zerlegung einer Matrix als Produkt dreier spezieller Matrizen, aus denen man bestimmte Eigenschaften der Matrix ablesen kann. (von engl. „Singular Value Decomposition“, SVD), Seite 25

*Sympathovagale Balance* bedeutet ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Sympathikus und Parasympathikus (Teilen des vegetativen Nervensystems des Menschen u.a. zur Regulation der Aktivierung bzw. An- / Entspannung des Menschen) [Lö199], Seite 69

*Tracking* das räumlich und zeitliche Erfassen eines Objektes zum Zwecke der Bestimmung der Lage und / oder Orientierung des Objektes in einem Koordinatensystem, Seite 9

*Überlagerungsgenauigkeit* Unterschied zwischen SOLL- und IST-Position einer AR-Einblendung im AR-Display bezogen auf eine reale Position, an der die Überlagerung stattfinden soll, Seite 22

*Usability* ist die Gebrauchstauglichkeit eines Verfahrens / technischen Produktes für einen bestimmten Einsatzzweck, Seite 12

*virtuell* nicht real existierend, meist vom Computer generiert und durch den Computer repräsentiert, Seite 6

---

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Gegenüberstellung der Wiederholrate einzelner Arbeitsschritte, des dabei erforderlichen Informationsbedarfs und des Unterstützungspotenzials der Augmented Reality . . . .	1
2.1	Augmented Reality als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine . . . . .	6
2.2	Reality-Virtuality Kontinuum . . . . .	7
2.3	Reflexvisier Revi C/12D . . . . .	8
2.4	Gekoppelte und ungekoppelte Systemkomponenten . . . . .	10
2.5	Inertialsensoren mit optischer Drift-Korrektur . . . . .	14
2.6	Optical See-Through (OST) . . . . .	17
2.7	Projection See-Through (PST) . . . . .	17
2.8	Video See-Through (VST) . . . . .	18
2.9	LookAround . . . . .	19
2.10	Handheld . . . . .	19
2.11	Unterschiedliche Aufnahme der Umwelt bei Sensor (Kamera) und Nutzer . . . . .	22
2.12	3D-Raumkoordinaten vom Trackingsystem und 2D-Bildschirmkoordinaten im HMD . . . . .	23
3.1	Unterschiedliche Forschungsfelder für die AR . . . . .	28
3.2	Verlegung von Kabelbäumen auf einer Flugzeugumpfschale . . . . .	29
3.3	Einsatz von Basistechnologien von der Produktentstehung bis zur Produktverwertung . . . . .	30
3.4	Darstellung ausgewählter OST-HMDs . . . . .	37
3.5	Entwurf eines HMDs für das AR-gestützte Training . . . . .	38
3.6	Entwurf eines HMD, welches das auf die Retina projizierte Bild verarbeitet (Kamera / Detector) und ergänzt (Projektor) . . . . .	39
3.7	Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der recherchierten STK-Verfahren . . . . .	40

3.8	Beispiele für Unterstützungskonzepte zur Navigation . . . . .	42
3.9	Kommissionierliste mit Angabe des Lagerortes . . . . .	43
3.10	Belastung und Beanspruchung beim Werker . . . . .	45
3.11	Identifizierte Schwerpunkte zu offenen nutzerbezogenen Fragestellungen für den Bereich der AR . . . . .	48
3.12	Vorgehensplan zur Untersuchung nutzerbezogener Parameter an einem Referenzarbeitsplatz . . . . .	49
4.1	Schema der Kommissionierung . . . . .	57
4.2	Getriebe in Einzelteilen und zusammengefügt . . . . .	57
4.3	Schema einer möglichen AR-gestützten Qualitätssicherung . . . . .	58
4.4	Entwurf eines Layouts des Versuchsaufbaus . . . . .	60
4.5	Komponenten des Referenzarbeitsplatzes . . . . .	61
4.6	Ablaufschema am Referenzarbeitsplatz . . . . .	62
4.7	Systemebenen . . . . .	63
4.8	Faktorenhierarchie der EZ-Skala . . . . .	67
4.9	EKG-Rekorder und EKG-Kurve . . . . .	68
4.10	Das Testsystem „TAP“ von Zimmermann und Fimm . . . . .	71
4.11	Problematische Darstellung von Informationen im HMD . . . . .	74
4.12	AR-unterstützte Navigation im Versuchsbereich . . . . .	75
4.13	Proband navigiert mittels expliziter Pfeilnavigation . . . . .	77
4.14	Sicht durch das HMD bei Einblendung eines Pfeils . . . . .	78
4.15	Sicht durch das HMD bei Einblendung eines Rechtecks . . . . .	79
4.16	Abhängige und unabhängige Variablen . . . . .	81
4.17	Ablauf der Versuchsdurchführung in einzelnen Zeitabschnitten . . . . .	82
4.18	Proband beim Kommissionieren mit AR-System am Referenzarbeitsplatz des Fraunhofer IFF Magdeburg . . . . .	84
4.19	Ergebnisse des Beschwerdefragebogens vor und nach dem Test mit AR . . . . .	84
4.20	Ergebnisse des Beschwerdefragebogens vor und nach dem Test mit der Papierliste . . . . .	85
4.21	Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit AR . . . . .	85
4.22	Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit Papierliste . . . . .	85
4.23	Vergleich der Differenzen der Ergebnisse der EZ-Skala vor und nach dem Test mit AR und Papierliste . . . . .	86
4.24	Ergebnisse der BFS vor und nach dem Test mit AR und Papierliste . . . . .	86
4.25	Verlauf der Herzschlagfrequenz während der sieben Versuchsphasen . . . . .	87
4.26	Verlauf der SDNN während der sieben Versuchsphasen . . . . .	88
4.27	Verlauf von LF zu HF während der sieben Versuchsphasen . . . . .	88
4.28	Fehlerverteilung je 1000 kommissionierter Teile . . . . .	89



4.29	Fehlerverteilung in drei Versuchsabschnitten . . . . .	89
5.1	Markierung des optimalen Bereichs für Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der STK . . . . .	98
5.2	Schema des vereinfachten Kalibriervorganges . . . . .	98
5.3	Durchführung des vereinfachten Kalibriervorgangs . . . . .	99
5.4	Trackingkamera (a), OST-HMD (b) und Augersatzkamera (c) . . . . .	100
5.5	Überlagerung von sechs bzw. 30 2D-Punkten auf den korre- spondierenden 3D-Raumpunkten . . . . .	101
5.6	Überlagerungsergebnis auf Basis von sechs (links) und 30 (rechts) Punktkorrespondenzen . . . . .	102
5.7	Initialer Kalibrierkörper mit 39 im Raum verteilten Markern . . . . .	103
5.8	Unterschiedliche Anordnungen von 2D- und 3D-Passpunkten (6M, 10M, 6R, 10R) zur Durchführung der See-Through- Kalibrierung . . . . .	103
5.9	Bestimmung des Versatzes durch Analyse des Überlagerungs- bildes der Augersatzkamera . . . . .	104
5.10	Beispiele für Überlagerungsfehler in fünf Bildschirmberei- chen nach durchgeführter Kalibrierung . . . . .	105
5.11	Durchschnittlicher Mittelpunktversatz in allen Bildschirmbe- reichen . . . . .	105
5.12	Mittelpunktversatz in den 3D-Schwerpunkten der Kalibrieran- ordnungen . . . . .	107
5.13	Verbesserter Kalibrierkörper mit 9 räumlich verteilten 3D- Punkten . . . . .	108
5.14	Schema der Mehr-Schritt-Kalibrierung . . . . .	109
5.15	Einblendung zur Kalibrierung mittels ESK: 2D-Passpunkte mit Hilfslinien . . . . .	110
5.16	Überprüfen der Qualität der Kalibrierung: Probandin markiert Eckpunkte der virtuellen Einblendung mittels Laserpointer . . . . .	111
5.17	Durchschnittlicher Kalibrierfehler für Testmarker . . . . .	113
5.18	Durchführungsdauer und Überlagerungsfehler der recher- chierten und neuen Verfahren . . . . .	117
5.19	Nach Verrutschen des HMDs ist eine Anpassung der Kalibrier- matrix notwendig . . . . .	117
6.1	Vorgehensplan zur Untersuchung nutzerbezogener Parameter an einem Referenzarbeitsplatz . . . . .	123
6.2	In der vorliegenden Arbeit untersuchte Schwerpunkte aus dem Bereich der nutzerbezogenen Fragestellungen . . . . .	124
6.3	Entwurf einer Tunnelvisualisierung nach Günthner et al. [GBRS09] . . . . .	125

---

# Tabellenverzeichnis

1.1	Interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Partner zur Verbesserung der mobilen AR . . . . .	3
2.1	Gegenüberstellung von OST und LookAround . . . . .	20
3.1	Für den industriellen Einsatz aussichtsreiche Geräte . . . . .	36
3.2	Einschätzung des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs in verschiedenen Bereichen der mobilen und stationären AR [BTP08] . . . . .	47
4.1	Anforderungen an die Untersuchungen . . . . .	53
4.2	Beurteilung der Szenarien zur Auswahl eines Anwendungsfalls für den Referenzarbeitsplatz Anhand der für die Versuchsdurchführung relevanten Anforderungen . . . . .	59
4.3	Überblick über die HRV-Parameter im Frequenzbereich . . . . .	69
4.4	Ergebnisse des Versuches . . . . .	77
5.1	Anforderungen an die Kalibrierung . . . . .	97
5.2	Auswertung hinsichtlich der Anforderungen an die Kalibrierung	116
6.1	Übersicht über verwendete Methoden und Techniken zur Bearbeitung der Fragestellungen der vorliegenden Arbeit . . . . .	124

---

## A.1 Anforderungen an mobile AR-Systeme in der Industrie

### A.1.1 Anforderungen an die Software

- Unterstützung verschiedener Anzeigeformen (Text, nicht kongruent, kongruent) je nach Bedarf beim Nutzer
- Vermeiden langer Umrüstzeiten - Benutzerprofile
- Einfache Bedienbarkeit
- Verwendung eindeutiger Informationsträger (Maximale / Minimale Schriftgrößen?)
- Einblendungen bei Bedarf abschaltbar
- Anzeigen: „so wenig wie möglich, so viel wie nötig“
- Benutzung wie beiläufig, nur sehr begrenzte Aufmerksamkeit für Bedienung notwendig - kognitive Ressourcen des Nutzers nicht überfordern!
- Stabilität der Software
- Betriebssystem und Softwaresystemkomponenten erfordern Industriestandard (z.B. MS Windows)

### A.1.2 Anforderungen an die Hardware am Nutzer

- Keine zusätzliche unvermeidbare Belastung durch AR-System erzeugen
- Arbeitsgeschwindigkeit und -qualität nicht verlangsamt gegenüber nicht-AR
- Hände frei
- Schweiß bzw. Hygiene → z.B. austauschbare Teile am Kopfträger

- Weltweite Einsetzbarkeit im Konzern (Klima, Mentalität, Arbeitsbedingungen, usw.)
- Keine Beeinträchtigung in der Sicht auf die reale Welt (nicht mehr als bei regulärer Sehhilfe-Brille)
- Stoßunempfindlichkeit: Fall aus 2 m Höhe auf glatten Beton
- Staubgeschützt, spritzwassergeschützt: mindestens IP54
- Temperaturbeständigkeit: -20 °C bis +50 °C
- Beständigkeit gegenüber Fetten / Ölen / Lösemitteln (Hautcremes?)
- Klare Definition von Verschleißteilen
- Intelligente Akkuladetechnik: 1000 Ladezyklen pro Akku
- Schichtzeit bis zu 10 Stunden im 1000sten Ladezyklus → Arbeitszeittauglichkeit
- Ergonomisch (Abmessung, Gewicht, Wärmeabstrahlung): möglichst mit Nachweis (Hinweis auf Normen, Grenzwerte und erreichte Werte)
- Keine Gesundheitsgefährdung des Anwenders: Biokompatibilität, Splitterschutz (keine spitzen Splitter entstehen)
- Mindestverfügbarkeit gegeben bzw. geringe Ausfallquote: Lebensdauer von 2 Jahren pro Gerät bei sachgemäßer Handhabung
- Kein negativer Einfluss auf umgebende Geräte und nicht beeinflussbar durch umgebende Geräte: CE-Siegel
- Einhaltung der Betriebsmittelvorschriften
- Servicedokumentation: eigene Instandhaltung des Betriebes muss damit umgehen können und Geräte in bestimmtem Umfang instand setzen können
- Baumustergenehmigung muss vorhanden sein
- Industriesteckverbinder: Akkuladegerät und weitere ansteckbare Geräte
- Verpolsicherheit
- Ausfallsichere Lichtquellen an allen Signalanzeigen
- Kurzschlussfestigkeit
- Zugentlastete Kabel mit hoher Biegewechselfestigkeit (wie hoch?)
- Trennung von Bedienung und Bildverarbeitung
- Definierte Befestigungs- und Montagemöglichkeiten
- Sinnvolle Farbcodierungen am Gerät
- Gewährleistung min. 2 Jahre (schwierig falls Distributor / Hersteller im Ausland)
- Drahtlose Netzwerkverbindung (stabil / Entfernung / Störungsanfälligkeit auf Industrieumgebung / Verschlüsselung wegen Datensicherheit)
- Einfache Inbetriebnahme durch den Anwender

### **A.1.3 Anforderungen an den Arbeitsplatz**

- Freie Beweglichkeit innerhalb eines definierten Arbeitsraumes
- Was ist bei Störungen während des laufenden Betriebs („Notfallplan“ bei „sensiblen“ Anwendungen)
- Zwang zu Kosteneinsparungen -> Technikeinsatz nur wo wirtschaftlich: Arbeitskosten gegen Einsparungen - Ergo: AR-Arbeitsplatz muss schneller und besser als vergleichbare Lösungen sein.

---

## A.2 Probandenaufklärung

### Angewandte Virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus (AVILUS) „Mobile Augmented Reality (AR) in industriellen Anwendungen“

- Psychophysiologische Beanspruchungsuntersuchungen  
an einem Modellarbeitsplatz -

### Probandenaufklärung

Sie sind als freiwilliger Proband darüber informiert, dass die vorgesehenen Untersuchungen im Rahmen des AVILUS-Projektes das Ziel verfolgen, die vegetative Beanspruchung beim Tragen moderner Head Mounted Displays (HMDs) zu erfassen und ggf. zu optimieren, damit bei einem späteren Einsatz in der Industrie Überbeanspruchungen vermieden werden und eine Akzeptanz der modernen Augmented Reality-Technik erzielt wird.

Vor den geplanten späteren Feldversuchen mit Werkern (u. a. am Montageband bei VW in Wolfsburg in der PKW-Fertigung) erfolgen Untersuchungen an einem Modellarbeitsplatz im Fraunhofer Institut (IFF) Magdeburg vor einem Kommissionierungsstand. Sie haben dabei zwei Stunden ununterbrochene Tätigkeiten zu verrichten, zu denen Ihnen die Anweisungen über ein Laser-Spiegelsystem direkt in ein Auge projiziert werden. An einem anderen Tag verrichten Sie die gleiche Tätigkeit ohne HMD und bearbeiten die Aufträge nach einer übergebenen schriftlichen Information ab. Es erfolgt durch uns ein statistischer Vergleich, bei welcher der beiden Varianten die Leistung besser und die Beanspruchung geringer ist. Die Versuchsleitung hat dazu einen balancierten Ablaufplan erstellt, um systematische Fehler zu vermeiden (Reihenfolge der Varianten, Tageszeit, Untersuchungsteam, Ausgangsbedingungen).

Die Untersuchungen basieren auf der Belastungs-Beanspruchungs-Konzeption der Arbeitsmedizin, die vereinfacht sagt, dass die individuellen Leistungsvoraussetzungen entscheiden, wie sich bei einer gegebenen Belastung die Beanspruchung einstellt. Das bedeutet, dass vor den eigentlichen Versuchen im IFF für jeden Probanden eine medizinische Statusuntersuchung erfolgen muss. Diese beinhaltet eine Anamnese, körperliche fachärztliche Untersuchung, Ruhe-EKG- und -Blutdruckmessung und eine augenmedizinische Statusuntersuchung.

Wir müssen bei den freiwilligen Versuchspersonen Ein- und Ausschlusskriterien beachten. Als Einschlusskriterien gelten neben der freiwilligen Teilnahme nur ein Lebensalter zwischen 20 und 30 Jahren (wegen der Homogenität der Versuchsgruppe) und der gegebene Unfallversicherungsschutz als Angehörige(r) bzw. Student(in) der Otto-von-Guericke-Universität.

Wir müssen Sie als Proband von der Studie ausschließen, wenn Sie eine Herz-Kreislauf-Erkrankung oder einen Hypertonus haben und wenn Sie Medikamente einnehmen, die die Herztätigkeit beeinflussen. Das ist wichtig, da wir die vegetative Beanspruchung über die Herzschlagfolge bestimmen (Heart Rate Variability Analyse). Als Ausschluss für die Studie gilt ein von uns festgestellter Fernvisus schlechter als 0,63 (d. h. ggf. mit Brille korrigiert), Brillenträger mit einem besseren



Visus werden nicht ausgeschlossen. Ferner werden Sie an dem Versuchstag von dem Modellarbeitsplatzversuch ausgeschlossen, wenn Sie nicht ausgeruht zur Untersuchung erscheinen oder wenn Sie unter Zeitdruck stehen bzw. andere Belastungen das Versuchsergebnis beeinflussen können.

An Zeit müssen Sie einplanen:

- für medizinische Statusuntersuchung und ophthalmologische Untersuchung im Institut für Arbeitsmedizin der Medizinischen Fakultät Magdeburg etwa 1,5 Stunden und
- für zwei Modellarbeitsplatzversuche an zwei verschiedenen Tagen im IFF Magdeburg mit jeweils ca. 3 Stunden, wobei davon jeweils 2 Stunden eine direkte EKG-Erfassung bei einer Kommissionierungsarbeit erfolgt und die restliche Zeit für Vor- und Nachbereitung (Einführungsgespräch, Fragebogenausfüllung, Elektrodenapplikation, Ruhe- und Erholungstest) geplant ist.

Es ist zu keinem Zeitpunkt der Untersuchung für Sie mit einer Gesundheitsgefährdung zu rechnen. Sie erklären Ihre freiwillige Bereitschaft durch Ihre Unterschrift auf einer Einwilligungserklärung. Dort unterschreiben wir als Versuchsleitung auch die Einhaltung des Datenschutzes.

Im Namen der Studienleitung  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Eberhard A. Pfister

Magdeburg, im April 2008

---

## A.3 Fragebögen der Nutzerstudie zur Beanspruchung am Referenzarbeitsplatz

Probandenkürzel:

Datum:

Seite: - 1 -

### Fragebogen zur Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Referenzarbeitsplatzes

#### ***Vorbefragung***

Mit folgenden Fragen möchten wir einige Informationen zu Ihrer Person erhalten, die für die Auswertung der Untersuchung von Bedeutung sein können. Bitte beantworten Sie alle Fragen wahrheitsgemäß.

Alter:	Jahre	Augendominanz:	rechts	links
		Geschlecht:	weiblich	männlich
		Händigkeit:	rechts	links

Tragen Sie eine Brille? ja nein

Ist die Brille eine Gleitsichtbrille? ja nein

Haben Sie im Moment körperliche Beschwerden? Wenn ja, welche?

Haben Sie im Moment andere Beschwerden? Wenn ja, welche?

Treiben Sie Sport? Wenn ja, welche Sportart und wie häufig? Wie schätzen Sie Ihren Trainingszustand ein?

Rauchen Sie? Wenn ja, wie viele Zigaretten pro Tag und seit wann?

Wie schätzen Sie Ihren Alkoholkonsum ein?

Nehmen Sie regelmäßig Medikamente ein?

Leiden Sie unter einer der folgenden Erkrankungen?

- Bluthochdruck (Nehmen Sie Medikamente dagegen ein?)
- Diabetes mellitus?
- Über- oder Unterfunktion der Schilddrüse (Nehmen Sie Medikamente ein?)

Probandenkürzel:

Datum:

Seite: - 2 -

### Vorwissen und Kenntnisse

	1 - 6
1. Wie viel Erfahrung hatten Sie bereits mit Augmented Reality / Virtual Reality vor der Teilnahme? (6 .. AR/VR-Profi, 1 .. keine)	
2. Haben Sie bereits Erfahrung mit anderen Werkerführungssystemen? (6 .. ich arbeite täglich damit, 1 .. noch nie davon gehört)	
3. Wie stehen Sie neuer Technik gegenüber? (6 .. stets begeistert von Neuerungen, 1 .. setze auf Altbewährtes)	
Kommentare:	

**Beschwerdefragebogen:**

<b>Fragen</b>	<b>überhaupt nicht</b>	<b>ein wenig</b>	<b>mittelmäßig</b>	<b>stark</b>	<b>sehr stark</b>
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Kopfschmerzen					
zeitweise unscharf sehen/nur mit Anstrengung scharf sehen					
Augenbrennen					
Scheinbewegung der Buchstaben					
Lichtempfindlichkeit					
Wörter/Zeilen überspringen					
Noten schlecht lesen können					
Blendung					
doppelt-konturig Sehen					
Verspannung der Hals-und Schultermuskulatur					
Augenermüdung					
den Finger zum Lesen mitbenutzen					
nahe heran gehen müssen					
weisse Flecken beim Lesen					
Andere Augenbeschwerden					

Gesamt

Prob.-Nr.: .....

Datum: .....

## Befindlichkeits-Skala BFS

- Verfahren zur Beurteilung des aktuellen Befindens -

### Ich fühle mich jetzt eher:

Eigenschaft	←	weder-noch	⇒	Eigenschaft
frisch				matt
teilnahmslos				teilnahmsvoll
froh				schwermütig
erfolgreich				erfolglos
gereizt				friedlich
entschlusslos				entschlussfreudig
lustig				weinerlich
gutgelaunt				verstimmt
appetitlos				appetitfreudig
gesellig				zurückgezogen
minderwertig				vollwertig
entspannt				gespannt
glücklich				unglücklich
scheu				zugänglich
sündig				rein
sicher				bedroht
verlassen				umsorgt
ausgewogen				innerlich getrieben
selbstsicher				unsicher
elend				wohl
beweglich				starr
müde				ausgeruht
zögernd				bestimmt
ruhig				unruhig
schwunglos				schwungvoll
nutzlos				unentbehrlich
schwerfällig				lebhaft
überlegen				unterlegen

Prob.-Nr.: .....

Datum: .....

### E Z - S k a l a nach Nitsch

auf meinen augenblicklichen Zustand zutreffend:

	kaum (1)	etwas (2)	einiger- maßen (3)	ziemlich (4)	über- wiegend (5)	völlig (6)
gespannt						
schläfrig						
beliebt						
kraftvoll						
gutgelaunt						
routiniert						
anstrengungsbereit						
unbefangen						
energiegeladen						
geachtet						
heiter						
ausdauernd						
sorgenfrei						
selbstsicher						
ausgeruht						
überlegen						
erholungsbedürftig						
zufrieden						
unternehmungslustig						
abgehetzt						
ruhig						
kontaktbereit						
müde						
anerkannt						
fröhlich						
nervös						
geübt						
konzentrationsfähig						
harmonisch						
sicher						
matt						
mitteilsam						
gelassen						
aktiv						
gefestigt						
erholt						
nützlich						
arbeitsfreudig						
vergnügt						
verausgabt						

---

## A.4 Fragebögen der Nutzerstudie zum Vergleich zweier STK-Verfahren

### Einführungsfragebogen [Ein-Schritt-Kalibrierung / Mehr-Schritt-Kalibrierung]

1. Alter:
2. Geschlecht: männlich / weiblich
3. Sind Sie Rechts- oder Linkshänder? rechtshändig / linkshändig
4. Höchster erreichter Bildungsabschluss:
  - a) Realschulabschluss
  - b) Hochschulreife
  - c) Bachelor
  - d) Diplom / Master
  - e) Promotion
  - f) Wenn Sie noch studieren, im wievielten Semester befinden Sie sich?
  - g) Was ist Ihre Studienrichtung?
5. Aktueller Beruf / Tätigkeit:
6. Hobbies:
7. Erfahrung mit Computern (1: niemals genutzt bis 7: Profi):
8. Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrung mit Computerspielen ein:
  - a) Ich habe noch niemals Computerspiele gespielt.
  - b) Ich habe Computerspiele bereits einige male gespielt.
  - c) Ich spiele Computerspiele bei Gelegenheit.
  - d) Ich spiele Computerspiele wöchentlich.
  - e) Ich spiele Computerspiele täglich.
9. Schätzen Sie die Anzahl an Stunden, die Sie wöchentlich spielen:
10. Haben Sie bereits Erfahrung mit Augmentierter oder virtueller Realität? ja / nein
11. Haben Sie bereits Erfahrung im Umgang mit Head Mounted Displays (HMDs)?  
(Mehrfachnennung möglich)
  - a) Keine.
  - b) Einmal bereits genutzt.
  - c) Zweimal genutzt.
  - d) Mehr als zweimal genutzt.
  - e) Etwas Erfahrung aus wissenschaftlichen Anwendungen.
  - f) Etwas Erfahrung aus kommerziellen Anwendungen.
  - g) Erfahrung aus anderen Bereichen (Bitte schildern sie kurz)
12. Bewerten Sie mit Noten von 1 (sehr gut) bis 5 (überhaupt nicht) wie gut Sie das Konzept von Überlagerungsfehlern in Augmented Reality verstanden haben:
13. Tragen Sie gewöhnlich eine Brille oder Kontaktlinsen? ja / nein
14. Nutzen Sie gerade sehkorrigierende Mittel? nein / ja, eine Brille / ja, Kontaktlinsen
15. Sind Ihnen irgendwelche Sehprobleme bekannt (z.B. Farbenblindheit)?
  - a) nein
  - b) ja, und zwar:



## **Abschlussfragebogen** [Ein-Schritt-Kalibrierung / Mehr-Schritt-Kalibrierung]

1. Bewerten Sie auf einer Skala von 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht) wie schwierig die Durchführung der Kalibrierung war:
  
2. Bewerten Sie auf einer Skala von 1 (zu viel) bis 5 (zu wenig), ob Ihnen auf dem Head-Mounted-Display, genügend oder nicht genügend Informationen zur Bewältigung Ihrer Aufgabe dargestellt wurden:
  
3. Mentale Belastung  
Wie viel geistige Anstrengung war von Ihnen nötig um die Kalibrierung durchzuführen? 1 (sehr wenig) bis 10 (sehr viel)
  
4. Physische Belastung  
Wie hoch war die physische Belastung während der Durchführung der Kalibrierung?  
1 (gering) bis 10 (hoch)
  
5. Zeitliche Belastung  
Wie viel Zeitdruck verspürten Sie bei der Durchführung der Kalibrierung?  
1 (keinen) bis 10 (sehr viel)
  
6. Arbeitsaufwand  
Wie schwer war es für Sie (geistig und körperlich) die Kalibrierung durchzuführen?  
1 (nicht schwer) bis 10 (sehr schwer)
  
7. Frustration  
Wie unsicher, irritiert, oder überfordert waren Sie während der Durchführung der Kalibrierung? 1 (sehr wenig) bis 10 (sehr stark)







---

## A.5 HMD Recherche

Die nachfolgende Übersicht stellt die recherchierten [OST-HMDs](#) sowie alle ermittelten Angaben zu den Kategorien



- Ergonomie
- Visualisierung
- Industrietauglichkeit
- Stand der Produktentwicklung

übersichtlich dar. Dabei fehlen bei vielen Geräten einige Angaben, da teilweise auch auf Nachfrage bei den Herstellern keine Auskunft über die fehlenden Daten zu erhalten war. Die einzelnen Unterpunkte der Kategorien sind an Systemmerkmalen nach Kocian und Task [\[KT95\]](#) orientiert.

Firma Name	Carl Zeiss Mobile Optics HMD Prototype	Microvision Nomad 2100	Liteye LitEye-500	Liteye LitEye-750	Lumus PD-10	Lumus PD-21 / PD-22
<b>Ergonomie</b> Gewicht der Anzeigeeinheit	40g	Display 128g + PDA 794g 23° x 17,25°	78g		<70g	
Sichtfeld		100%			32°	22°
Durchsichtsrate		30cm - unendlich			>70%	>50%
Fokustiefe		25mm			max. 30mm	25mm
<b>Visualisierung</b> Augenentfernung						
Display-Technologie	OLED	Retinal Scanning Display	OLED	OLED	800x600	320x240
Maximale Auflösung	mono	800x600	852x600	800x600	mono	mono (PD-21) / stereo (PD-22)
Mono / Stereo		mono	mono	mono	mono	mono
Leuchtdichte [cd/m <sup>2</sup> ]		3,43 to 2741,12 (verstellbar)	>100	100:1	RGB	RGB
Kontrast		20:1 (10 - 30°C)	RGB	Color	75Hz	
Farben		Monochrom rot		32bit		
Farbtiefe		5bit				
Bildwiederholrate		60Hz				
<b>Industrietauglichkeit</b>		4h (WLAN eingeschaltet)	-35 - 65°C	-30 - 80°C		
Akkulaufzeit		0 - 45°C	Produktion eingestellt	starke Verdeckung des Sichtfeldes	Prototyp	Prototyp
Temperaturbereich		20% bis 85%	3,300 €	5.000 €		
Luftfeuchtigkeit	wird nicht verkauft	FCC Class A, Class 1 laser product	BFI OPTILAS GmbH	BFI OPTILAS GmbH	www.lumusvision.com	www.lumusvision.com
Regularien	Designstudie	Produktion eingestellt	BFI OPTILAS GmbH	BFI OPTILAS GmbH	www.lumusvision.com	www.lumusvision.com
<b>Stand der Produktentwicklung</b>	Zeiss GmbH Flyer: "See-through Head Mounted Display Functional Demonstrator"	3,300 €	BFI OPTILAS GmbH	BFI OPTILAS GmbH	www.lumusvision.com	www.lumusvision.com
Kommentar						
Preis						
Foto						
Quelle		www.microvision.com	BFI OPTILAS GmbH	BFI OPTILAS GmbH	www.lumusvision.com	www.lumusvision.com

Firma Name	Lumus PD-26	NVIS nVisor ST	NVIS P-50	Rockwell Collins ProView SL40	Rockwell Collins ProView XL40/50STm	Rockwell Collins SimEye SR100
<b>Ergonomie</b>	Gewicht der Anzeigeeinheit					
Sichtfeld	<50g 27,5°	~ 1300g 60° diagonal	~ 1000g 50° diagonal	Display 79g + Controller 200g 32° x 24° (40° diagonal)	~ 800g 35° x 26° (44° diagonal 100% overlap)(XL40) 47° x 26° (54° diagonal 74% overlap)(XL50) 21%	~ 860g 100° x 50° (30% overlap)
Durchsichtsrate	>50%	40%	50%			
Fokustiefe	25mm	26mm	1 - 2m			
Augenentfernung						
<b>Visualisierung</b>						
Display-Technologie	LCD	LCOS Reflective	LCOS Reflective	AMLCD	AMLCD	AMLCD
Maximale Auflösung	640x480	1280x1024	1280x1024	800x600	1024x768	1280x1024
Mono / Stereo	mono / stereo (optional)	mono / stereo max. 103	mono / stereo	mono	mono / stereo	mono / stereo
Leuchtdichte [cd/m²]			34,26	>100:1	17,13 - 68,52	68,52
Kontrast				monochrom (grün?)	monochrom grün	RGB
Farben	RGB	RGB	RGB	85Hz	8bit 60Hz	85Hz
Farbtiefe		24bit	24bit			
<b>Industrietauglichkeit</b>						
Bildwiederholrate		60Hz	60Hz			
Akkulaufzeit						
Temperaturbereich				-32 - 63°C	-17,8 - 52°C	
Luftfeuchtigkeit				95% (30 - 60°C)	up to 95% non-condensing	
Regulieren				Produktion eingestellt	zu schwer, Headtracker; integriertes Audio-Headset € 37.095	zu schwer, Headtracker
<b>Stand der Produktentwicklung</b>	Prototyp	zu schwer € 28.900	zu schwer US\$ 34.900			
Kommentar						
Preis		€ 28.900	US\$ 34.900		€ 37.095	
Foto						
Quelle	<a href="http://www.lumusvision.com">www.lumusvision.com</a>	<a href="http://www.nvisinc.com">www.nvisinc.com</a>	<a href="http://www.nvisinc.com">www.nvisinc.com</a>	<a href="http://www.rockwellcollins.com">www.rockwellcollins.com</a>	<a href="http://www.rockwellcollins.com">www.rockwellcollins.com</a>	<a href="http://www.rockwellcollins.com">www.rockwellcollins.com</a>

Firma Name	Saab	Shimadzu	Trivisio	Trivisio	RockwellCollins	KonicaMinolta
<b>Ergonomie</b> Gewicht der Anzeigeeinheit	<b>AddVisor 150</b>	<b>DataGlass 3/A</b>	<b>Monocular M3</b>	<b>OST Binocular</b>	<b>ProView™ SO35-MTV</b>	<b>Holographic See-Through-Browser</b>
Sichtfeld	< 1000g 46° diagonal 100% overlap 60° diagonal 50% overlap	120g 24° diagonal ~ 3%	110g 26° x 19° (~32° diagonal)	430g + Controller 480g 41,6° x 31,2°	Display Modul - 180g (incl. Brillengestell) Display Controller - 380g 28 h x 21 v	27g (ohne Kabel und Controller) 14° h x 10° v
Durchsichtsrate	35%	~ 3%	5%	12%	1m (ab Werk anpassbar)	(persönlicher Eindruck: ähnlich Nomad)
Fokustiefe			~ 25mm	20mm		
Augenentfernung						
<b>Visualisierung</b>						
Display-Technologie	LCOS				AMOLED	HOE (Holographic Optical Element)
Maximale Auflösung	1280x1024	800x600	800x600	800x600	800x600	320x240
Mono / Stereo	mono / stereo	mono	mono	mono / stereo	mono	mono
Leuchtdichte [cd/m²]	220,22				0,1-35 foot - Lamberts	200
Kontrast	30:1				>100:1	30:1 - 40:1
Farben	RGB		RGB	RGB	RGB in, green out	RGB
Farbtiefe	24bit	60Hz	18bit	18bit	24bit	24-bit
<b>Industrietauglichkeit</b>					bis 85Hz	wie NTSC
Akkulaufzeit		USB power	USB power	ca. 4h (standard Batterien) Ni-MH 6V/2, 1Ah	VIN 6-24 VDC, 2.5 W nominal, 10-20 Stunden	3h (2xAAA Batterien)
Temperaturbereich		-10 - 40 °C			-32 °C to +55° C Six 48 hour cycles, 20° C, 55° C	
Luftfeuchtigkeit					95% RH	
Regularien						
<b>Stand der Produktentwicklung</b>						
Kommentar	zu schwer, Non-See-Through Einstellung möglich	zu geringe Durchsichtsrate, dust and water proof	zu geringe Durchsichtsrate, integriertes Mikrofon; Kopfhöreranschluss	Prototyp, zu schwer, zu starke Verdeckung der Umwelt	90 Tage Gewährleistung, 5-6 Monate Lieferzeit	Prototyp
Preis	€ 75.000	~ € 1.160	€ 3.145	€ 3.145	€ 11.000	
Foto						
Quelle	<a href="http://www.est-kl.de">www.est-kl.de</a>	<a href="http://www.shimadzu.co.jp/hmd/">www.shimadzu.co.jp/hmd/</a>	<a href="http://www.trivisio.de">www.trivisio.de</a>	<a href="http://www.trivisio.de">www.trivisio.de</a>	<a href="http://www.rockwellcollins.com">www.rockwellcollins.com</a>	Email Hr. Endo und Fr. Shimizu; Konica Minolta Opto Inc.

Firma Name	LASTER Technologies	Trivisio	
<b>Ergonomie</b>	<b>Pro Mobile Display</b>	<b>View-Up Monocular Display</b>	
Gewicht der Anzeigeeinheit	90 g	< 100g, Kopftträger 210g	
Sichtfeld	40° x 30°	29° diagonal	
Durchsichtsrate	65%	mind. 50%	
Fokustiefe	30cm bis 3m (manuell)		
Augenentfernung	35 mm		
<b>Visualisierung</b>		LCD	
Display-Technologie	800x600	800x600	
Maximale Auflösung	1800 Lumen		
Mono / Stereo	800:1		
Leuchtdichte [cd/m²]	RGB		
Kontrast	24 bit		
Farben	?		
Farbtiefe	? (5V Spannungsversorgung)		
Bildwiederholrate			
<b>Industrietauglichkeit</b>			
Akkulaufzeit	Prototyp: Kommerzielles Produkt für Q1 2010 geplant	Prototyp	
Temperaturbereich			Email Hr. Spaas, Trivisio GmbH
Luftfeuchtigkeit			
Regularien			
<b>Stand der Produktentwicklung</b>			
Kommentar			
Preis			
Foto			
Quelle	Email Hr. Jouault; LASTER Technologies		

---

## A.6 Fördervermerk, Studentische Arbeiten, Patente

Die Arbeiten zur vorgestellten Thematik wurden teilweise vom Wirtschaftsministerium des Landes Sachsen-Anhalt (ZBNr. 0604/00006) sowie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Fkz. 01IM08001L und 01IM08002A) gefördert.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende studentische Arbeiten betreut:

- Christian Scharf: *Untersuchung geeigneter Informationsdarstellungen für mobile Augmented Reality in industriellen Anwendungen* (Diplomarbeit [Sch07])
- Martin Pfeiffer: *Entwicklung und Umsetzung eines Lokalisierungs- und Navigationskonzeptes für einen Augmented Reality gestützten Referenzarbeitsplatz* (Diplomarbeit [Pfe08])
- Martin Kastsian: *Genauigkeit Mobiler Augmented Reality Systeme - Untersuchungen am Referenzarbeitsplatz* (Diplomarbeit [Kas08])
- Jens Grubert: *Ermittlung der Projektionsmatrix für die See-Through-Kalibrierung von Optical-See-Through Displays* (Laborpraktikum [GTM08])
- Thomas Pfahl, Christian Darius, Krasimira Radionova: *Entwicklung einer erweiterten Auftragsgenerierung* (Laborpraktikum)
- Daniel Anderson: *Entwurf und Implementierung einer Sensorik für die See-Through-Rekalibrierung von optischen Durchsichtdisplays* (Studienarbeit [And09])
- Pang Lei: *Neue VDT User Interfaces für Kleinbildschirm-Geräte* (Praktikum)

Des Weiteren wurde folgende Erfindungsmeldung zur Patentanmeldung eingereicht:

- Rüdiger Mecke, Johannes Tümler, Christian Scharf, Werner Schreiber, Thomas Alt (gemeinschaftliche Anmeldung Fraunhofer Gesellschaft, Volkswagen AG, metaio GmbH) 2007: *Angepasste Visualisierung für Augmented Reality*



---

## A.7 Liste der eigenen Veröffentlichungen

### A.7.1 2006

Sauer, Steffen; Berndt, Dirk; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Modellbasierte Vollständigkeitsprüfung bei Montageprozessen*. Leistungen und Ergebnisse - Jahresbericht 2006, Fraunhofer IFF Magdeburg, Seiten 64-65, 2006.

Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Mobile Augmented Reality für die Werkerassistenz*. In: Forschung vernetzen, Innovationen beschleunigen - wissenschaftliches Kolloquium, Seiten 40-50. Fraunhofer IFF Magdeburg, Germany, 2006. ISBN 978-3-8167-7335-1.

### A.7.2 2007

Berndt, Dirk; Mecke, Rüdiger; Teutsch, Christian und Tümler, Johannes: *Montageassistenz mit Augmented Reality - mobile Mess- und Prüftechnik schafft Durchblick*. IFFocus - Mensch-Maschine interaktiv, 2:44-46, 2007. ISSN 1862-5320.

Sauer, Steffen und Tümler, Johannes: *Ein Assistenzsystem zur Verbesserung von Montageprozessen*. In: Forschung vernetzen, Innovationen beschleunigen - wissenschaftliches Kolloquium. Fraunhofer IFF Magdeburg, Germany, 2007. ISBN 978-3-8167-7557-7.

Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Doil, Fabian und Paul, Georg: *Mobile Augmented Reality in industriellen Anwendungen: Nutzerzentrierte Fragestellungen und Ansätze für deren Lösung*. In: Böckelmann, Irina und Pfister, Eberhard A. (Herausgeber): 11. Symposium Arbeitsphysiologie für Nachwuchswissenschaftler, Seite P12. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Medizinische Fakultät, Institut für Arbeitsmedizin, 2007. ISBN 978-3-00-022757-8.

Tümler, Johannes, Mecke, Rüdiger und Xu, Jian: *See-Through Kalibrierverfahren für mobile Augmented Reality Assistenzsysteme*. In: Gausemeier, Jürgen und Grafe, Michael (Herausgeber): *Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, Band 6, Seiten 233-247. Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn, Germany, HNI-Verlagsschriftenreihe, 2007. ISBN 978-3-939350-28-6.

### A.7.3 2008

Bade, Christian; Tümler, Johannes und Paul, Georg: *Stationary and Mobile Augmented Reality in Industrial Applications*. In: Proceedings of the International Conference on Information Technologies (InfoTech-2008), Seiten 213-222, Sofia, Bulgaria, Publishing House King, 2008. ISBN 978-954-9518-56-6.

Grubert, Jens; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Untersuchungen zur Optimierung der See Through Kalibrierung für mobile Augmented Reality Assistenzsysteme*. In: Forschung vernetzen, Innovationen beschleunigen - wissenschaftliches Kolloquium. Fraunhofer IFF Magdeburg, Germany, 2008.

Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Doil, Fabian; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Distribution of Visual Attention in Head-worn Displays*. In: Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization 2008 (APGV08), Los Angeles, California, USA, 2008. ISBN 978-1-59593-981-4.

Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger und Doil, Fabian: *Visual Search in Head-up Displays*. In: Perception, European Conference on Visual Perception ECVP, 2008.

Pfeiffer, Martin; Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Paul, Georg und Doil, Fabian: *Entwicklung und Umsetzung eines Lokalisierungs- und Navigationskonzeptes für einen Augmented Reality gestützten Referenzarbeitsplatz*. In: Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme - 10. IFF-Wissenschaftstage, 25.-26. Juni, Magdeburg, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2008. ISBN 978-3-8167-7630-7.

Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Doil, Fabian; Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Roggentin, Anja; Pfister, Eberhard A. und Böckelmann, Irina: *Einbeziehung der Herzratenvariabilität für eine objektive Beanspruchungsanalyse beim Einsatz mobiler Augmented Reality an einem Referenzarbeitsplatz*. In: 50. Fachausschusssitzung Anthropotechnik - Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., 2008. ISBN 978-3-932182-60-X.

Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Doil, Fabian und Paul, Georg: *Mobile Augmented Reality in industriellen Anwendungen: Nutzerzentrierte Fragestellungen und Ansätze für deren Lösung*. In: Produkt- und Produktions-Ergonomie - Aufgabe für Entwickler und Planer, Seiten 795-798. GfA Press, 2008. ISBN 978-3-936804-06-5.

Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Roggentin, Anja; Pfister, Eberhard A.; Paul, Georg; Doil, Fabian und Böckelmann, Irina: *Beanspruchungsanalyse beim zweistündigen Einsatz mobiler Augmented Reality an einem Referenzarbeitsplatz*. In: 12. Symposium „Arbeitsmedizin für Nachwuchswissenschaftler“, Seiten 18-19. Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), 2008. ISBN 978-3-9808342-6-1.

Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Schenk, Michael; Huckauf, Anke; Doil, Fabian; Paul, Georg; Pfister, Eberhard A.; Böckelmann, Irina und Roggentin, Anja: *Mobile Augmented Reality in Industrial Applications: Approaches for Solution of User-Related Issues*. In: Proceedings of the Seventh IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008 (ISMAR08), Seiten 87-90, Cambridge, UK, 2008. IEEE Press. ISBN 978-1-4244-2840-3.

Tümler, Johannes; Roggentin, Anja; Mecke, Rüdiger; Doil, Fabian; Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Pfister, Eberhard A. und Böckelmann, Irina: *Subjektive Beanspruchung beim Einsatz mobiler Augmented Reality Systeme*. Ergo-Med (5), 2008. ISSN 0170-2327.

Tümler, Johannes; Sauer, Steffen; Berndt, Dirk und Mecke, Rüdiger: *Bildverarbeitung und Augmented Reality für industrielle Anwendungen*. In: Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung, Band 7, HNI-Verlagsschriftenreihe, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2008. ISBN 978-3-939350-51-4.

Tümler, Johannes; Scharf, Christian; Mecke, Rüdiger; Paul, Georg und Schenk, Michael: *Incorporating User Preference to Represent Information for Manual Work Supported by Augmented Reality*. In: Proceedings of X Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR 2008), Joao Pessoa, Brazil, 2008. ISBN 85-7669-167-1.

Tümler, Johannes; Scharf, Christian; Mecke, Rüdiger und Paul, Georg: *Berücksichtigung der Nutzerpräferenz zur Informationsdarstellung bei Augmented Reality gestützten manuellen Tätigkeiten*. In: Hauser, Helwig, Strassburger, Steffen und Theisel, Holger (Herausgeber): *Simulation und Visualisierung* 2008. SCS European Publishing House, 2008. ISBN 3-936150-53-2.

Xu, Jian; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *A Concept for Virtual Reality Based Authoring of Augmented Reality Content*. In: *Augmented und Virtual Reality in der Produktentstehung*, Band 7, HNI-Verlagsschriftenreihe. Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2008. ISBN 978-3-939350-51-4.

#### **A.7.4 2009**

Grubert, Jens; Tümler, Johannes und Mecke, Rüdiger: *Nutzerstudie zum Vergleich zweier Durchführungsmethoden der See-Through-Kalibrierung*. In: 6. Fachtagung „Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme“ - 12. IFF-Wissenschaftstage, 16.-18. Juni, Magdeburg, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2009.

Huckauf, Anke; Urbina, Mario; Böckelmann, Irina; Schega, Lutz; Doil, Fabian; Mecke, Rüdiger und Tümler, Johannes: *Besonderheiten der Wahrnehmung bei AR-basierten Ausgabegeräten*. In: 6. Fachtagung „Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme“ - 12. IFF-Wissenschaftstage, 16.-18. Juni, Magdeburg, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF Magdeburg, 2009.

Roggentin, Anja; Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger; Pfister, Eberhard A. und Böckelmann, Irina: *Arbeitsphysiologische Beanspruchungsanalyse beim Einsatz von Head-Mounted-Displays*. In: 49. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM), Aachen, 2009.

Schoor, Wolfram; Masik, Steffen; Tümler, Johannes; Adler, Simon; Hofmann, Marc und Trostmann, Erik: *A Concept for Applying VR and AR Technologies to Support Efficient 3D Noncontact Model Digitalization*. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality (VR2009)*, Seiten 257-258, IEEE Press, Lafayette, USA, 2009. ISBN 978-1-4244-3812-9.

Urbina, Mario H.; Böckelmann, Irina; Doil, Fabian; Tümler, Johannes und Huckauf, Anke: *Visuelle Leistungen bei AR-basierten Ausgabegeräten*. In: *Tagungsband der Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TEAP)*, Seite 114, 2009.

#### **A.7.5 2009 eingereicht**

Grubert, Jens; Tümler, Johannes; Mecke, Rüdiger und Schenk, Michael: *Comparative Study of two See-through Calibration Methods*. In: *Eighth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR09)*, 2009 (eingereicht).

Huckauf, Anke; Urbina, Mario H.; Böckelmann, Irina; Schega, Lutz; Mecke, Rüdiger; Grubert, Jens; Doil, Fabian und Tümler, Johannes: *Perceptual Issues in Optical-See-Through Displays*. In: *Eighth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR09)*, 2009 (eingereicht).

Schwerdtfeger, Björn; Reif, Rupert; Günthner, Willibald A.; Klinker, Gudrun;

Hamacher, Daniel; Schega, Lutz; Böckelmann, Irina; Doil, Fabian und Tümler, Johannes: *Pick-by-Vision: A First Stress Test*. In: Eighth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR09), 2009 (*eingereicht*).

---

## A.8 Wissenschaftlicher Werdegang

Johannes Tümler erwarb 2005 das Bakkalaureat der Ingenieurinformatik an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, wo er 2006 zum Diplom-Ingenieurinformatiker im Bereich Augmented Reality graduierte und externer Doktorand am Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme der Fakultät für Informatik wurde. Von 2006 bis 2008 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) in Magdeburg, wo er Projekte auf dem Gebiet der Augmented Reality bearbeitete. Seit 2009 ist er Forschungsmitarbeiter der Volkswagen AG in Wolfsburg. Seine Interessengebiete liegen in Bereichen mobiler Displaytechnologien, der virtuellen und erweiterten Realität sowie deren industrieller Anwendung.