

FORSCHUNGSBERICHT

W.A. Günthner · T. Rammelmeier

Vermeidung von Kommissionierfehlern mit
Pick-by-Vision

Forschungsbericht

der Forschungsstelle

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16398 N**

Vermeidung von Kommissionierfehlern mit Pick-by-Vision

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2012

ISBN: 978-3-941702-27-1

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49 89 289 15921

Telefax: + 49 89 289 15922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Konzeptes für die aktive Vermeidung von Kommissionierfehlern in der manuellen Kommissionierung basierend auf dem Augmented-Reality-unterstützten Kommissioniersystem Pick-by-Vision.

Zunächst wurden hierzu Untersuchungen zum Auftreten verschiedener Fehlerarten durchgeführt, sowie die Ursachen und Auswirkungen von Kommissionierfehlern ermittelt. Als zentrale Fehlerursache wird von den befragten Logistikleitern und Kommissionierern der Mensch genannt, der durch Unaufmerksamkeit oder den falschen Umgang mit technischen Hilfsmitteln maßgeblich zur Fehlerentstehung beiträgt. Durch die Integration eines zusätzlichen Prüfmechanismus auf Basis eines Ident- oder Trackingsystems soll es zudem ermöglicht werden, auftretende Fehler unmittelbar am Entstehungsort zu entdecken und zu beheben.

Für die technische Umsetzung des Prüfmechanismus und dessen Integration in ein Pick-by-Vision System wurden mehrere Konzepte entwickelt, die den Anforderungen verschiedener Einsatzszenarien für ein fehlersicheres Pick-by-Vision System gerecht werden. Ein flexibel einsetzbares und kostengünstiges Konzept basiert auf dem Einsatz einer in das Head-mounted Display integrierten Videokamera. Neben der Funktion als Sensor in einem Trackingsystem ermöglicht die Kamera auch die Auswertung optischer Codes von Artikeln, indem der Kommissionierer diese einfach nach der Entnahme in das Sichtfeld hält. Durch die Überprüfung jeder einzelnen Entnahmeeinheit ist ein solches Konzept theoretisch in der Lage, eine Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung ermöglichen.

Zur Evaluierung der Einsatzfähigkeit dieses Konzeptes wurde ein Demonstrator realisiert. In mehreren Versuchsreihen mit Probanden, u. a. mit Kommissionierern von zwei Projektpartnern, konnten praxisnahe Erfahrungen zum Einsatz des Systems gewonnen werden. Die Ergebnisse der Probandenversuche zeigten, dass mit dem fehlersicheren Pick-by-Vision System die Fehlerquote um etwa 40 % gegenüber der klassischen Belegkommissionierung gesenkt werden kann. Durch die Einbeziehung subjektiver Bewertungskriterien, war es möglich, auch Aussagen zu ergonomischen und arbeitsphysiologischen Auswirkungen zu treffen, sowie Maßnahmen für die kontinuierliche Verbesserung von Pick-by-Vision Systemen, insbesondere bezüglich der verwendeten Hardwarekomponenten, abzuleiten.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Wissenschaftlich-technische Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Forschungsziel | 2 |
| 1.2.1 | Angestrebte Forschungsergebnisse | 2 |
| 1.2.2 | Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse | 4 |
| 1.2.3 | Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels | 4 |
| 2 | Stand der Technik und der Wissenschaft | 7 |
| 2.1 | Augmented Reality | 7 |
| 2.1.1 | Begriffsdefinition | 7 |
| 2.1.2 | Funktionsweise und Systemaufbau | 8 |
| 2.2 | Kommissionierung | 10 |
| 2.2.1 | Begriffsdefinition und Systemaufbau | 10 |
| 2.2.2 | Kommissionierprozess | 13 |
| 2.2.3 | Logistische Kennzahlen | 15 |
| 2.2.4 | Technologien der Informationsbereitstellung | 21 |
| 3 | Analyse von Kommissionierfehlern in der Praxis | 30 |
| 3.1 | Auswirkungen von Kommissionierfehlern | 30 |
| 3.2 | Ursachen von Kommissionierfehlern | 31 |
| 3.3 | Maßnahmen zur Fehlervermeidung | 39 |
| 4 | Einsatzszenarien und Anforderungen | 44 |
| 4.1 | Einsatzszenarien | 44 |
| 4.2 | Anforderungsdefinition | 48 |
| 5 | Konzeptentwicklung | 51 |
| 5.1 | Vorgehen bei der Konzeptentwicklung | 51 |
| 5.2 | Konzepte ohne Trackingsystem | 55 |
| 5.2.1 | Technologieübersicht | 55 |
| 5.2.2 | Optische Identifikation und Lasermesstechnik | 56 |

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.3 | Mechanische Identifikation anhand des Gewichtes | 59 |
| 5.2.4 | Elektromagnetische Identifikation mittels RFID | 60 |
| 5.3 | Konzepte mit Trackingsystem | 64 |
| 5.3.1 | Technologieübersicht | 65 |
| 5.3.2 | Mechanisches Tracking | 66 |
| 5.3.3 | Inertiales Tracking | 66 |
| 5.3.4 | Akustisches Tracking | 67 |
| 5.3.5 | Elektromagnetisches Tracking | 68 |
| 5.3.6 | Funkbasiertes Tracking | 69 |
| 5.3.7 | Optisches Tracking | 70 |
| 5.3.8 | Hybrides Tracking | 72 |
| 5.4 | Vorausgewählte Konzepte | 73 |
| 5.4.1 | Konzept 1: Lichtvorhang vor Regal | 73 |
| 5.4.2 | Konzept 2: Waage auf Kommissionierwagen | 76 |
| 5.4.3 | Konzept 3: RFID-Handschuh | 78 |
| 5.4.4 | Konzept 4: Kommissionierwagen mit Identsystem | 81 |
| 5.4.5 | Konzept 5: IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms | 84 |
| 5.4.6 | Konzept 6: Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen | 86 |
| 5.4.7 | Konzept 7: Kopfbasierte Kamera | 88 |
| 5.5 | Konzeptauswahl | 91 |
| 6 | Realisierung des Demonstrators | 94 |
| 6.1 | Komponenten des Systems | 94 |
| 6.1.1 | Übersicht | 94 |
| 6.1.2 | Visualisierungsmedium | 95 |
| 6.1.3 | Mobiler Rechner | 96 |
| 6.1.4 | Interaktionsgeräte | 98 |
| 6.1.5 | Software | 99 |
| 6.2 | Funktionen des Demonstrators | 100 |
| 6.2.1 | Interaktionskonzept | 100 |
| 6.2.2 | Kontextbezogene Anzeige der Prozessinformationen | 102 |
| 6.2.3 | Fehlerüberprüfung und Fehlerhandling | 104 |
| 6.2.4 | Wegfindung | 106 |
| 6.2.5 | Sonstige Funktionen | 107 |

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| 7 | Evaluierung des Demonstrators | 109 |
| 7.1 | Evaluierung im Labortest | 109 |
| 7.1.1 | Versuchsaufbau und -durchführung | 109 |
| 7.1.2 | Ergebnisse | 117 |
| 7.2 | Evaluierung im Praxistest | 131 |
| 7.2.1 | Versuchsaufbau und -durchführung | 131 |
| 7.2.2 | Ergebnisse | 132 |
| 7.3 | Fazit Evaluierung | 137 |
| 8 | Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick | 139 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 139 |
| 8.2 | Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten | 140 |
| 8.3 | Ausblick | 141 |
| | Literaturverzeichnis | 143 |
| | Abbildungsverzeichnis | 155 |
| | Tabellenverzeichnis | 159 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 160 |
| | Anhang A Konzeptauswahl | A-1 |
| | Anhang B Kommissionierliste für die Probandenversuche | B-5 |
| | Anhang C Fragebögen für die Probandenversuche | C-6 |

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Im Rahmen des IGF (Industrielle Gemeinschaftsforschung) Forschungsvorhabens 14756 N „Pick-by-Vision“ wurde ein neuartiges Kommissionierverfahren auf Basis der Augmented-Reality-Technologie entwickelt. Es hat sich gezeigt, dass die Informationsbereitstellung durch Augmented Reality (AR) mittels einer Datenbrille eine effektive Kommissioniertechnologie darstellt. Die AR-Technologie bietet die Möglichkeit, verschiedenste Prozessschritte in der Kommissionierung zu unterstützen, wobei vor allem die Entnahme und die Ablage der Artikel sowie der Weg durch das Lager die größten Verbesserungspotenziale gegenüber existierenden Kommissioniertechniken bieten. Diese Vorgänge lassen sich in Abhängigkeit vom eingesetzten Kommissioniersystem und der Erfahrung des Mitarbeiters mit unterschiedlichen Visualisierungen unterstützen. Im IGF-Forschungsvorhaben 14756 N wurden dazu zwei unterschiedliche Funktionsmuster entwickelt. Die Evaluierung beider Systeme ließ erkennen, dass die Probanden sehr schnell mit den Systemen umgehen konnten und sicher durch den Prozess geführt wurden. Es zeigte sich, dass ein Pick-by-Vision System eine schnellere Kommissionierung als beispielsweise eine intuitive Papierliste zulässt. Die Kommissionierfehlerquote war ebenfalls niedriger als mit der Papierliste, schwankte allerdings signifikant und war für eine Praxisanwendung noch zu hoch. [Gün-2009]

Eine Schwachstelle bestehender Pick-by-Vision Systeme ist die Tatsache, dass trotz der optischen Hervorhebung des Entnahmefachs ein Fehlgriff möglich ist. Dieser Punkt war nicht Untersuchungsgegenstand bisheriger Forschungsprojekte zur AR-Kommissionierung. Im Projekt „Pick-by-Vision“ lag der Schwerpunkt auf der Visualisierung über die Datenbrille.

Deshalb wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision II“ (IGF-Forschungsvorhaben 16398 N) die Fehlervermeidung mit einem AR-unterstützten Kommissioniersystem untersucht, weil dies eine notwendige Funktion für den produktiven Industrieinsatz ist.

1.2 Forschungsziel

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Primäres Ziel des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision II“ ist es, das im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 14756 N entwickelte Pick-by-Vision System so zu erweitern bzw. zu modifizieren, dass damit eine Fehlerquote nahe der Null-Fehler-Kommissionierung erreicht wird, ohne den Handhabungsaufwand für den Kommissionierer zu erhöhen. Dabei soll die Vermeidung von Kommissionierfehlern bzw. deren Entdeckung und Behebung unmittelbar am Entstehungsort erfolgen.

In diesem Forschungsvorhaben werden vielfältige weitere wissenschaftlich-technische Ergebnisse angestrebt, die sich mit den folgenden Stichpunkten zusammenfassen lassen:

- Gewinnung von Erkenntnissen über Fehlerarten, Ursachen und Auswirkungen von Kommissionierfehlern
- Entdeckung und ggf. Behebung auftretender Fehler mit Pick-by-Vision unmittelbar am Entstehungsort
- Integration verschiedener Konzepte der Funktion zur Fehlervermeidung
- kontinuierliche Verbesserung des Pick-by-Vision Systems
- Aufzeigen des Mehrwerts durch den Einsatz eines Trackingsystems
- Aussagen zu ergonomischen und arbeitsphysiologischen Auswirkungen
- praxisnahe Erfahrungen aus Tests bei zwei Industriepartnern
- Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung
- Aussagen zur Wirtschaftlichkeit

Um Technologien zur Fehlervermeidung mit der AR-Technologie zu entwickeln, gilt es zunächst, mögliche Fehlerarten sowie deren Ursachen und Auswirkungen in der Praxis zu untersuchen. Diese Erkenntnisse werden für die Weiterentwicklung des Pick-by-Vision Systems verwendet, können aber auch in weitere Untersuchungen einfließen.

Aufgrund seiner flexiblen Einsetzbarkeit bleibt der Mensch auch zukünftig ein wichtiger Bestandteil der Kommissionierung. Durch eine Fehlervermeidungsstrategie soll der Kommissionierer bestmöglich bei seiner Arbeit unterstützt werden. Der

Kommissionierablauf mit Pick-by-Vision ist folglich so zu gestalten, dass Fehler erst gar nicht entstehen können. Sollten dennoch Fehler auftreten, gilt es diese am Entstehungsort zu entdecken und zu korrigieren.

Für die Realisierung von Kommissioniersystemen existieren vielzählige Varianten, durch die sich auch unterschiedliche Einsatzszenarien für Pick-by-Vision ergeben. Folglich ist eine Anpassung von Pick-by-Vision, insbesondere der Subsysteme Interaktion, Tracking und Visualisierung, an das jeweilige Kommissioniersystem erforderlich. Auch die Funktion zur Fehlervermeidung muss an das jeweilige Einsatzfeld angepasst werden, so dass die Erarbeitung verschiedener Lösungskonzepte notwendig ist. Im Rahmen des Forschungsprojektes sollen die Funktionsmuster aus dem IGF-Forschungsvorhaben 14756 N nicht nur um die neue Funktion erweitert, sondern auch hinsichtlich Neuerungen in der AR-Technologie kontinuierlich verbessert werden.

Generell werden zwei Arten von Pick-by-Vision Systemen unterschieden: Systeme mit und ohne Trackingsystem. Ein Trackingsystem unterstützt zwar durch die optische Hervorhebung des Lagerfachs den Kommissionierer, dass er in das richtige Fach greift, allerdings kann dies nicht sichergestellt werden. Da ein Trackingsystem die Komplexität erhöht und zu höheren Kosten führt, ist es ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes, den Nutzen eines Trackingsystems zu bewerten.

Unter anderem für diese Bewertung ist die Evaluierung des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems im Rahmen von Probandenversuchen notwendig. Im Rahmen der Evaluierung sollen nicht nur die Einsatzfähigkeit der neuen Funktion zur Fehlervermeidung sondern auch logistische Kennzahlen sowie arbeitsphysiologische und ergonomische Aspekte und Auswirkungen auf den Arbeitsschutz untersucht werden.

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes ist es, aussagekräftige Erkenntnisse zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes eines fehlersicheren Pick-by-Vision Systems zu gewinnen. Zwar hängen Kosten und Nutzen vom einzelnen Anwendungsfall ab, jedoch können die im Rahmen der Probandenversuche gewonnenen logistischen Kennzahlen in weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen einfließen. Schließlich soll durch die Integration der Fehlervermeidung eine Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung erreicht werden, denn eine hohe und konstante Qualität sind eine der wesentlichen Anforderungen an die Kommissionierung.

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Dieses Forschungsvorhaben trägt zur Weiterentwicklung eines Verfahrens, nämlich der Augmented-Reality-unterstützten Kommissionierung bei. Pick-by-Vision hat seine Vorteile im IGF-Forschungsvorhaben 14756 N unterstrichen, aber eine Fehlervermeidung, v. a. hinsichtlich der Entnahme falscher Artikel, wurde noch nicht berücksichtigt. Deshalb besteht der Anspruch darin, eine Lösung zu finden, die den Kommissionierprozess nicht verlangsamt, d. h. ohne zusätzliche Handhabungsschritte auskommt, und ihn trotzdem sicherer macht.

Eine wichtige Anforderung an manuelle Kommissioniersysteme ist die optimale Unterstützung der Kommissionierer, so dass sie ihre Arbeit möglichst ohne Fehler ausüben können. Dies gilt sowohl für unternehmenseigene Beschäftigte als auch für Leiharbeiter, die im Lager kurzfristig 80 bis 90 % der Belegschaft ausmachen können [Gil-2008].

Der Fokus bisheriger Untersuchungen von AR-Kommissioniersystemen lag meist auf der Visualisierung. Funktionen zur Fehlervermeidung wurden dabei nicht betrachtet. Sie stellen somit einen innovativen Ansatz des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision II“ dar.

Eine erfolgversprechende Anwendung wie Pick-by-Vision kann indirekt auch zur Weiterentwicklung von Produkten beitragen, indem es einen Anstoß für weitere Forschungstätigkeiten im Bereich der AR-Technologien gibt. Beispielsweise kann ein Signal an die Hersteller von AR-Komponenten ausgehen, denn ein fehlender Massenmarkt für Produkte, wie z. B. Datenbrillen, verhindert oftmals deren Weiterentwicklung.

1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Vorgehen bei der Projektbearbeitung erfolgte anhand eines Projektplans mit zehn aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP) mit einem zeitlichen Umfang von insgesamt 24 Mannmonaten (MM).

AP 1: Analyse von Kommissionierfehlern in der Praxis (4 MM)

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Untersuchung von Kommissionierfehlern bei Industriepartnern, um anschließend die Anforderungen an die Fehlervermeidung mit AR definieren zu können. Dabei wurden im Rahmen von Prozessanalysen und

Mitarbeitergesprächen die Häufigkeit von Kommissionierfehlern und deren Ursachen und Auswirkungen analysiert. Außerdem wurden Maßnahmen zur Fehlervermeidung identifiziert, die bereits heute eingesetzt werden.

AP 2: Anforderungen an die Fehlervermeidung mit AR (2 MM)

Auf Basis der Ergebnisse des AP 1 wurden in einem zweiten Schritt Einsatzszenarien erarbeitet und Anforderungen an die Fehlervermeidung mit der AR-Technologie definiert. Neben dem Gesamtsystem des fehlersicheren Pick-by-Vision erfolgte dabei auch eine getrennte Betrachtung der Subsysteme Werkerführung und Fehlerüberprüfung.

AP 3: Konzepte ohne Trackingsystem (3 MM)

Ein Trackingsystem ist Bestandteil jedes vollständigen AR-Systems. Allerdings ist der Einsatz von Tracking nicht in jedem Kommissioniersystem möglich und erhöht generell die Komplexität von Pick-by-Vision. Aus diesem Grund wurden zunächst Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung ohne den Einsatz eines Trackingsystems erarbeitet und möglichen Einsatzszenarien von Pick-by-Vision zugeordnet.

AP 4: Konzepte mit Trackingsystem (2 MM)

In Abhängigkeit der Einsatzszenarien wurden analog zu AP 3 Konzepte für die Funktion zur Fehlervermeidung unter Berücksichtigung von Trackingsystemen entwickelt. Bei der Vorauswahl von geeigneten Konzepten wurde insbesondere berücksichtigt, dass das System auch in Kommissioniersystemen mit großem Abdeckungsbereich nutzbar ist.

AP 5: Recherche geeigneter Komponenten (1 MM)

Aus den in AP 3 und AP 4 erarbeiteten Konzepten wurde ein erfolgversprechendes Konzept ausgewählt, sowie für die anschließende Implementierung geeignete Hard- und Software recherchiert.

AP 6: Implementierung der Konzepte (4 MM)

In der Implementierungsphase wurde das ausgewählte Konzept genauer spezifiziert und als Demonstrator umgesetzt.

AP 7: Evaluierung im Labortest (3 MM)

In Probandenversuchen unter Laborbedingungen wurde die Kommissionierung mit dem fehlersicheren Pick-by-Vision System evaluiert. Neben der Einsatzfähigkeit der neuen Funktion der Fehlervermeidung konnten auch Aussagen zu einem längeren Einsatz getroffen werden. Im Rahmen der Versuchsreihen erfolgte sowohl die Messung logistischer Kennzahlen als auch die subjektive Bewertung von Beanspruchungsfaktoren.

AP 8: Überarbeitung und Anpassung (2 MM)

Aus den Erkenntnissen der vorangegangenen Labortests wurden entsprechende Verbesserungsmaßnahmen für den Demonstrator abgeleitet. Außerdem wurde das System für die Praxistests vorbereitet.

AP 9: Evaluierung im Praxistest (2 MM)

Im Rahmen von Praxistests in Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern ließen sich die Funktionstüchtigkeit und Anwendbarkeit der neuen Funktion der Fehlervermeidung unter Beweis stellen und neue Erkenntnisse für den Praxiseinsatz eines Pick-by-Vision Systems hervorbringen.

AP 10: Dokumentation (1 MM)

Zur weiteren Nutzung der während des Projektes erarbeiteten Forschungsergebnisse werden diese in Form eines ausführlichen Forschungsberichtes dokumentiert. Die Gliederung dieses Forschungsberichtes ist an die Arbeitspakete angelehnt. Im einleitenden Kapitel 2 erfolgt eine Einführung in den Stand der Technik und die Klärung wichtiger Begrifflichkeiten. Das Vorgehen und die Ergebnisse der Analyse von Kommissionierfehlern im Rahmen des AP 1 sind in Kapitel 3 dargestellt. Die im Kapitel 4 zusammengetragenen Anforderungen an ein fehlersicheres Pick-by-Vision System sind Ergebnisse des AP 2. Die AP 3 und AP 4 wurden im Kapitel 5 „Konzeptentwicklung“ zusammengefasst. AP 5 und AP 6 bilden das Kapitel 6 „Realisierung des Demonstrators“. Die Evaluierung des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems (AP 7 bis AP 9) ist Inhalt des Kapitels 7. Im abschließenden Kapitel 8 werden die Ergebnisse den Zielen des Forschungsvorhabens gegenübergestellt und der technische und wirtschaftliche Nutzen aufgezeigt.

2 Stand der Technik und der Wissenschaft

Das Kapitel 2 umfasst Definitionen und Grundlagen für die Entwicklung eines fehler-sicheren Pick-by-Vision Systems. Mit der Augmented-Reality-Technologie und der Kommissionierung werden die beiden zentralen Themen dieses Forschungsprojektes in knapper Form hinsichtlich des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik vorgestellt.

2.1 Augmented Reality

2.1.1 Begriffsdefinition

Der Begriff der Augmented Reality („Erweiterte Realität“) beschreibt die Anreicherung der realen Umgebung des Menschen durch virtuelle, rechnergenerierte Informationen (vgl. z. B. [Alt-2003]). Hierbei wird nicht nur der visuelle Sinn [Azu-2001], sondern beliebige menschliche Sinneswahrnehmungen angesprochen [Mil-1999]. Aufgrund seiner Dominanz steht der visuelle Sinn jedoch meist im Vordergrund.

Die Augmented-Reality-Technologie lässt sich anhand des Reality-Virtuality-Kontinuums nach Milgram einordnen und abgrenzen. Dabei liegt die AR zwischen einer nicht modellierten, realen Welt und einer komplett modellierten, virtuellen Welt (VR). Im Gegensatz zur Augmented Virtuality (AV) befindet sich die AR jedoch näher an der Realität (vgl. Abbildung 2-1). [Mil-1994]

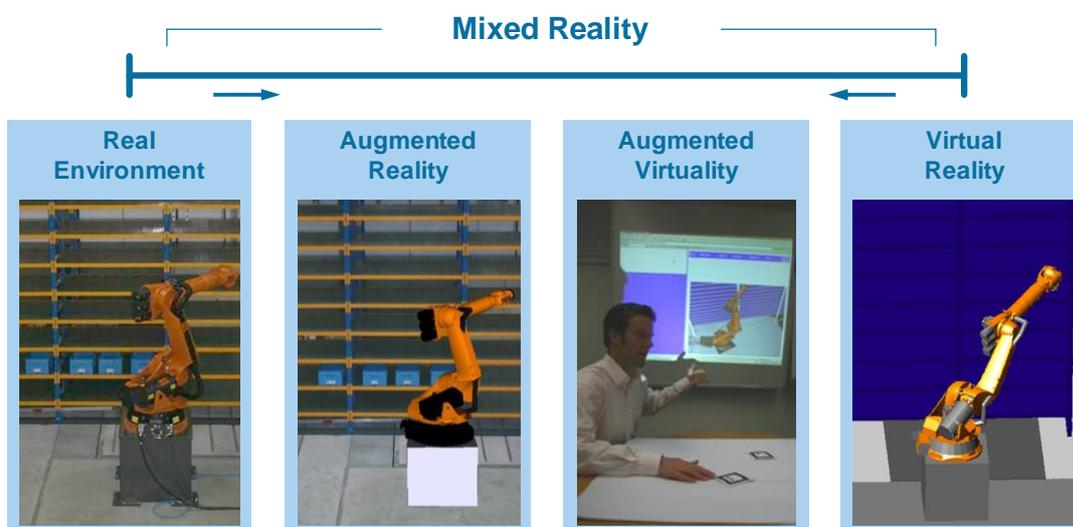


Abbildung 2-1: Reality-Virtuality-Kontinuum (vgl. [Gün-2011c] nach [Mil-1994])

In der Fachliteratur existieren verschiedene Definitionen der AR-Technologie, die sich auf unterschiedliche Ausprägungen von AR-Systemen beziehen. Bleiben deren technische Eigenheiten unberücksichtigt, so kann ein AR-System definiert werden, wie folgt: Ein AR-System ist ein System, welches virtuelle und reale Objekte kombiniert und in eine 3-dimensionale Beziehung stellt sowie die Interaktion in Echtzeit erlaubt [Azu-1997].

Zur Umsetzung der Maximalanforderungen an ein AR-System gilt es, dreidimensionale virtuelle Objekte exakt an der richtigen Position sowie in der richtigen Perspektive darzustellen. Dies stellt jedoch hohe Anforderungen an das AR-System und ist nicht für jede Anwendung erforderlich. Nach [Gün-2011c] lassen sich in Anlehnung an [Rei-2009], [Alt-2003], [Fri-2004] und [Pat-2004] die drei folgenden Arten der Informationsbereitstellung unterscheiden:

- **Kontextunabhängig:** Die Informationen werden ohne Berücksichtigung der Situation sowie ohne Bezug zur räumlichen Umgebung bereitgestellt.
- **Kontextabhängig** (situationsgerecht): Die Informationen werden dem aktuell betrachteten, realen Objekt zugeordnet und dementsprechend zur richtigen Zeit und am richtigen Ort bereitgestellt.
- **Kongruent:** Die Informationen werden exakt an der Position des entsprechenden realen Objektes und in der richtigen Perspektive bereitgestellt.

2.1.2 Funktionsweise und Systemaufbau

Ein AR-System dient dem Zweck, rechnergenerierte Informationen situationsgerecht, d. h. zur richtigen Zeit und am richtigen Ort, mit der Realität zu überlagern. Zur Visualisierung der Informationen kommt in mobilen Anwendungen oftmals eine Datenbrille, ein sog. Head-mounted Display (HMD), zum Einsatz.

Während sich die realen Objekte in einem gewissen Abstand vor dem Auge des Anwenders befinden, werden die virtuellen Informationen in der sog. virtuellen Objektweite vor dem realen Objekt angezeigt. Die Überlagerung der virtuellen und realen Objekte entsteht, indem diese gleichzeitig durch den Betrachter wahrgenommen werden. [Alt-2003]

Als virtuelle Informationen können sowohl statische (z. B. ein Text) als auch dynamische Inhalte dargestellt werden, die sich in Abhängigkeit von der Position und der Blickrichtung des Nutzers perspektivisch anpassen.

Nach [Rei-2009] besteht ein Augmented-Reality-System aus den folgenden fünf Hauptkomponenten:

- Visualisierungsmedium
- Trackingsystem
- Datenhaltungssystem
- Szenengenerator
- Interaktionsgerät

Ein Beispiel eines AR-Systems für die Fabrikplanung ist schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt. Das System ermöglicht es, dem Nutzer einen virtuellen Roboter in einen bestehenden Fertigungsbereich einzublenden.

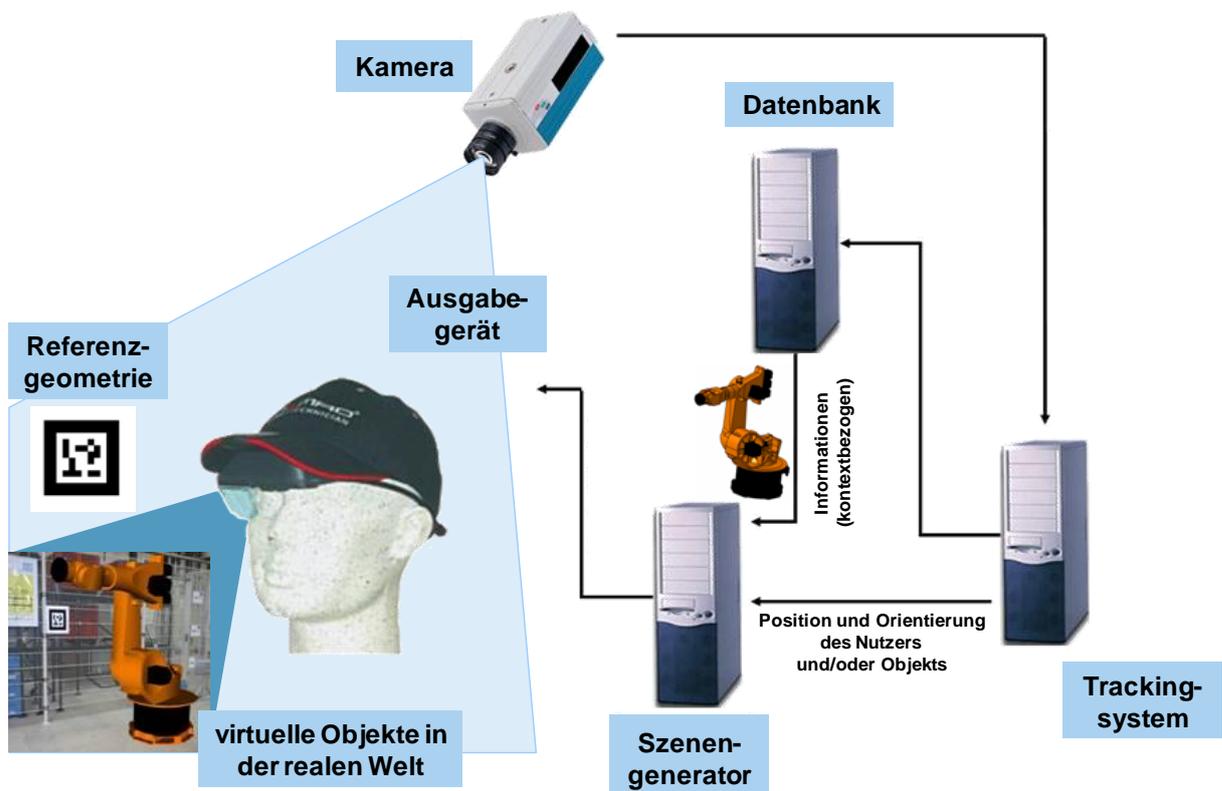


Abbildung 2-2: Komponenten eines Augmented-Reality-Systems [Rei-2009]

Die Funktion des **Visualisierungsmediums** ist die Anzeige der virtuellen Information. Als direkte Schnittstelle zum Menschen ist das Visualisierungsmedium von ent-

scheidender Bedeutung, um den Nutzer bedarfsgerecht und ergonomisch mit relevanten Informationen zu versorgen und so eine möglichst hohe Akzeptanz zu erzielen [Gün-2011c]. Im Beispiel der Abbildung 2-2 kommt als Visualisierungsmedium ein HMD zum Einsatz, bei dem die Projektion der virtuellen Information auf einen halbtransparenten Spiegel erfolgt. Die Transparenz des Spiegels ermöglicht dem Kommissionierer zeitgleich den Blick auf die Realität.

Das **Trackingsystem** ist notwendig, um die Pose (Position und Orientierung) [Tön-2010] von Objekten oder Systemnutzern zu ermitteln. Die aus dem Trackingsystem gewonnenen Daten können im Anschluss an die Positionserfassung genutzt werden, um die virtuellen Informationen mit realen Objekten oder Orten zusammenzubringen und lagegerecht in die Szene zu integrieren [Sas-2008]. Das AR-System in Abbildung 2-2 enthält ein optisches Trackingsystem, bei dem eine Kamera einen zweidimensionalen (2D) Marker als Referenzgeometrie erfasst.

Im **Datenhaltungssystem** sind sämtliche für die Informationsbereitstellung relevanten Daten hinterlegt, die im jeweiligen Kontext aufgerufen werden. Auf Basis dieser Daten erzeugt der **Szenengenerator** die virtuellen Objekte in der für den Anwender richtigen Perspektive, um diese auf dem Visualisierungsmedium auszugeben.[Alt-2003]

Das **Interaktionsgerät** ist neben dem Visualisierungsmedium die zweite entscheidende Schnittstelle zwischen einem AR-System und dessen zum Nutzer [Gün-2011c]. Es wird verwendet, um einen Arbeitsschritt zu bestätigen oder eine bestimmte Funktion des AR-Systems aufzurufen. Ziel ist es, aktiv und in Echtzeit in die Szene eingreifen zu können [Gün-2009].

2.2 Kommissionierung

2.2.1 Begriffsdefinition und Systemaufbau

Nach einer Festlegung des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) in der VDI-Norm 3590, ist es das Ziel der Kommissionierung, „aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen“ [VDI3590]. Ein Kommissioniersystem besteht aus den drei folgenden Teilsystemen [VDI3590]:

- Materialflusssystem
- Organisationssystem
- Informationssystem

Für jedes der drei Teilsysteme existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Realisierungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden ausgewählte Realisierungsformen aufgezeigt, die für den Einsatz eines fehlersicheren Pick-by-Vision Systems relevant sind.

Bei der Gestaltung des **Materialflusssystems** ist festzulegen, wie Kommissionierer und Artikel räumlich und zeitlich effizient zusammengeführt werden können, und in welcher Form die entnommenen Artikel weiter transportiert werden [Ten-2010]. Hinsichtlich der Fortbewegung des Kommissionierers wird unterschieden, ob sich der Kommissionierer zum Bereitstellort bewegt (statische Bereitstellung), oder die Bereitstellungseinheiten zum Kommissionierer bewegt werden (dynamische Bereitstellung). Weiterhin wird unterschieden, ob sich der Kommissionierer nur innerhalb einer Lagergasse oder eines Stockwerks bewegt und ob dabei eine vertikale Bewegung vollzogen wird. Die Entnahme der Güter kann sowohl automatisch durch eine Maschine als auch manuell von einem Mitarbeiter durchgeführt werden. Dabei können bei jedem Zugriff mehrere Teile oder nur ein einzelnes Teil entnommen werden. Der Anteil der überwiegend manuellen Kommissioniersysteme liegt im industriellen Durchschnitt bei etwa 50 % [Lün-2002]. Die klassische Art der Kommissionierung ist die manuelle Kommissionierung nach dem Prinzip Mann-zur-Ware (MzW). Bei dieser Art der Kommissionierung erfolgt die Bereitstellung statisch und ein Mitarbeiter führt die Entnahme händisch aus. Da bei der manuellen MzW-Kommissionierung das Potenzial hinsichtlich Leistungs- und Qualitätsverbesserung durch Pick-by-Vision am größten ist [Gün-2009], beschränken sich die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes auf diese Art der Kommissionierung.

Im Hinblick auf die Aufbauorganisation des **Organisationssystems** ist zu erwähnen, dass ein Kommissionierlager aus mehreren Zonen bestehen kann. Es kann also notwendig sein, dass der Kommissionierer zwischen den Zonen wechselt. In Abhängigkeit von der Auftragsstruktur kann es sinnvoll sein, die Ablauforganisation so zu gestalten, dass ein Kommissionierer nicht nur einen (auftragsorientierte Entnahme) sondern mehrere Kundenaufträge bearbeitet. Bei der artikelorientierten Entnahme werden zunächst die Artikel für mehrere Aufträge gesammelt und in einer zweiten Stufe den Kundenaufträgen zugeteilt. Weitere Verfahren sind das sog. Multi-Order-Picking und Pick-und-Pack. Beim Multi-Order-Picking werden von einem

Kommissionierer zur gleichen Zeit mehrere Aufträge bearbeitet. Hierfür sind z. B. auf einem mitgeführten Kommissionierwagen mehrere Sammelbehälter vorhanden, die jeweils einem bestimmten Kundenauftrag zugeordnet sind [Mar-2006]. Bei einem Pick-und-Pack Prozess erfolgt die Kommissionierung direkt in den Versandkarton [Mar-2006]. Eine genauere Betrachtung des Organisationssystems, insbesondere der Betriebsorganisation, ist für dieses Forschungsprojekt nicht erforderlich.

Der Fokus dieses Forschungsprojektes liegt auf dem **Informationssystem**, bei dem die Vorgänge Auftragserfassung, Auftragsaufbereitung, Weitergabe und Quittierung unterschieden werden [VDI3590]. Die Auftragsaufbereitung erfolgt heute meist automatisch durch ein Datenverarbeitungssystem, das sowohl eine automatische Auftragserfassung als auch das Eintippen von Kundenaufträgen zulässt. Zur Unterstützung der internen und externen Logistik werden softwarebasierte Warehouse-Management-Systeme (WMS) eingesetzt, die die Abbildung, Steuerung und Optimierung des kompletten innerbetrieblichen Material- und Informationsflusses ermöglichen [Wol-2012]. Moderne WMS sind modular aufgebaut und umfassen neben den Kernfunktionen, z. B. Auftragsbearbeitung, Auftragsfreigabe oder Inventur, auch Zusatzfunktionen und Erweiterungsmodule zur Anbindung von beleglosen Kommissioniersystemen, wie z. B. Pick-by-Voice [Wol-2012]. Für dieses Forschungsprojekt sind vor allem die Vorgänge Weitergabe und Quittierung des Informationssystems relevant. Der Vorgang der Weitergabe gibt Aufschluss darüber, in welcher Art die Kommissionieraufträge an den Kommissionierer übermittelt werden. Dabei ist es möglich, entweder eine Einzelposition oder mehrere Positionen an den Kommissionierer weiterzugeben [VDI3590]. Dies kann mit einem Beleg oder beleglos [VDI3590], beispielsweise per Pick-by-Light oder Pick-by-Vision, geschehen. Da davon ausgegangen wird, dass insbesondere die Art der Informationsbereitstellung einen großen Einfluss auf das Auftreten von Kommissionierfehlern hat, werden die klassische Belegkommissionierung und beleglose Verfahren in Abschnitt 2.2.4 gegenübergestellt. Die Quittierung eines Prozessschrittes, z. B. einer Entnahme, kann manuell, automatisch oder in einer Mischform aus beiden erfolgen. Dieser Vorgang kann für jede Entnahmeeinheit, jede Position und/oder den gesamten Auftrag durchgeführt werden. Beispiele hierfür sind das manuelle Abhaken von Auftragszeilen einer Kommissionierliste, die automatische Artikelidentifikation einzelner Entnahmeeinheiten und gleichzeitige Quittierung mittels Barcode-Scan oder die Überprüfung und Quittierung des gesamten Auftrags im Rahmen einer Endkontrolle.

2.2.2 Kommissionierprozess

Für die weiteren Betrachtungen wird von der manuellen MzW-Kommissionierung ausgegangen. Der Kommissionierprozess lässt sich in die drei folgenden Bausteine zerlegen [Gün-2009]:

- Vorbereitung
- Kommissioniervorgang
- Nachbereitung

Aufgaben im Rahmen der **Vorbereitung** sind beispielsweise das Anmelden des Kommissionierers an das System, der Weg zur Basis oder das Aufnehmen eines Sammelbehälters.

Der eigentliche **Kommissioniervorgang** besteht aus den Grundfunktionen Entnahme, Ablage in den Sammelbehälter und Abgabe des Auftrags [VDI3590] sowie dem Weg vom Ausgangspunkt zum Entnahmeort, den Wegen zwischen den Entnahmeorten und dem Weg zum Abgabeort. Während die Wege vom Ausgangspunkt und zum Abgabeort sowie die Abgabe einmalig während eines Kommissionierauftrags durchzuführende Schritte sind, werden die Entnahme, die Ablage und die Wege zwischen den Entnahmeorten für jede Position wiederholt. Diese Bausteine lassen sich noch weiter in Prozessschritte unterteilen. Jeder Weg-Baustein beginnt mit dem Prozessschritt der Informationsaufnahme. Sobald der Kommissionierer den Zielort kennt, folgt die eigentliche Bewegung. Der Weg-Baustein wird durch die Quittierung der Ankunft am entsprechenden Zielort abgeschlossen. Beim Baustein Entnahme erfolgt zunächst die Identifikation des entsprechenden Entnahmeortes bevor der Artikel ggf. vereinzelt und gegriffen wird. Nach der Identifikation des Ablageortes erfolgt in einem fließenden Übergang die Ablage der entnommenen Artikel. Die Bausteine Entnahme und Ablage werden so oft wiederholt, bis die erforderliche Stückzahl des Artikels kommissioniert wurde. In Abhängigkeit von den Anforderungen an das einzelne Kommissioniersystem wird jede Entnahme oder jede Position quittiert. Nach der Identifikation des Abgabeorts erfolgen die Abgabe und die Quittierung des Auftrags.

Beispiele für Aufgaben der **Nachbereitung** eines Auftrags sind die Abgabe des Sammelbehälters, die Verpackung des Auftrags, der Weg zurück zur Basis oder das Abmelden vom System.

Eine Übersicht über die Bausteine des Kommissionierprozesses ist in der Abbildung 2-3 enthalten. Iterationen zwischen einzelnen Schritten sowie die artikelweise Quittierung der Entnahme bleiben in der Abbildung unberücksichtigt.

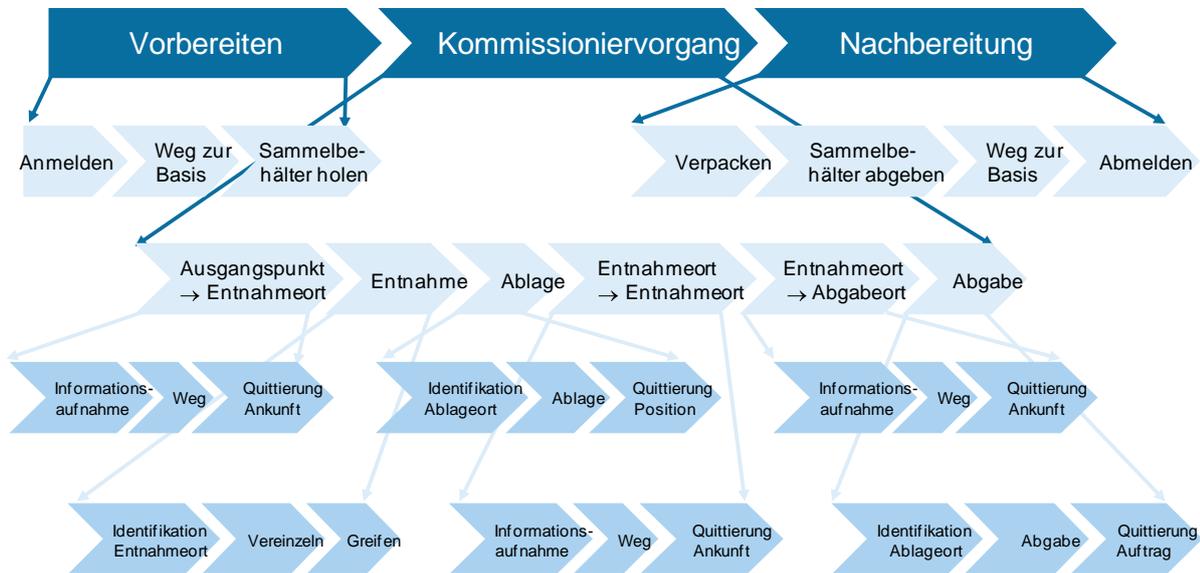


Abbildung 2-3: Allgemeiner Kommissionierprozess [Gün-2009]

In Abhängigkeit von der jeweiligen Realisierung eines Kommissioniersystems werden nicht alle Prozessschritte durchlaufen. Ebenfalls ist es möglich, die Schritte für detailliertere Untersuchungen weiter zu untergliedern oder diese zusammenzufassen. Günthner unterscheidet bei der AR-unterstützten Kommissionierung die folgenden Prozessschritte [Gün-2009]:

1. Anmelden an das System
2. Weg zur Basis
3. Sammelbehälter holen
4. Informationsaufnahme Entnahmeort
5. Weg zum Entnahmeort
6. Quittierung Ankunft
7. Identifikation Entnahmeort
8. Vereinzeln der Artikel
9. Greifen der Artikel
10. Identifikation Ablageort
11. Ablage (ggf. artikelweise Quittierung)
12. Quittierung Position
13. Identifikation Abgabeort
14. Abgabe

15. Quittierung Auftrag
16. Abgabe Sammelbehälter
17. Abmelden

2.2.3 Logistische Kennzahlen

Wichtige Kriterien für die Bewertung von Kommissionierprozessen sind deren Leistung und Qualität. Im Folgenden werden diese Kriterien näher beschrieben und wichtige Kennzahlen vorgestellt.

2.2.3.1 Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit ist die Zeit, die für die Bearbeitung eines Kommissionierauftrags benötigt wird. Sie setzt sich nach [Arn-2005] aus den vier folgenden Zeitanteilen zusammen:

- Basiszeit
- Wegzeit
- Greifzeit
- Totzeit

Die **Basiszeit** umfasst die Zeit, während der sich der Kommissionierer vor Beginn und nach Abschluss der eigentlichen Kommissionierung an der Basis aufhält. Synonym wird auch der Begriff Auftragsrüstzeit verwendet. In der Basiszeit sind beispielsweise die Übernahme des Auftrags, das Aufnehmen leerer Sammelbehälter und die Abgabe der gefüllten Behälter enthalten. [Gud-2010]

Im Gegensatz zu den anderen Zeitanteilen der Kommissionierzeit, ist die Basiszeit nur einmal pro Auftrag zu berücksichtigen und hängt nicht von der Anzahl der Positionen oder Picks ab. Wesentlichen Einfluss auf die Basiszeit hat die Gestaltung des Informationssystems [Gün-2009]. So entfällt beispielsweise bei beleglosen Kommissionierverfahren der Zeitaufwand für die Annahme, das Ordnen und die Abgabe der Kommissionierbelege (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Die **Wegzeit** charakterisiert den Zeitbedarf der Bewegung von der Annahmestelle über die Entnahmeorte bis hin zur Abgabestelle. Sie wird durch die Ablauforganisa-

tion sowie von den Bereitstelltechniken und -mitteln beeinflusst. So verkürzt beispielsweise die Bereitstellung mit Stichgängen die Wegzeit. [Gün-2009]

Mit einem Anteil von 50 bis 70 % beeinflusst sie am stärksten die Kosten der Kommissionierung [Vog-1997]. Der Anteil der Wegzeit an der Kommissionierzeit beträgt bis zu 60 % bei der MzW-Kommissionierung [Bry-1995]. Die Geschwindigkeit eines Kommissionierers reicht von 1,0 bis 1,4 m/s, wenn er zu Fuß geht, bzw. 0,7 bis 2,5 m/s, wenn ein Fahrzeug eingesetzt wird. Ab einem Laufweg von 20 m rentiert sich der Einsatz eines Flurförderzeugs und bei Regalhöhen über 1,8 m ein Bediengerät. [Vog-1997]

Die Minimierung der Wegzeit kann durch eine optimierte Einlagerungslogistik (Zonenbildung z. B. nach dem Kriterium Umschlaghäufigkeit), die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Aufträge oder durch eine Wegoptimierung erfolgen [Gün-2009].

Die **Greifzeit** umfasst die Zeit für den physischen Vorgang von der Entnahme bis zur Ablage der Entnahmemenge und ist somit die eigentliche Leistungszeit in der Kommissionierung [Gud-2010]. Die Greifzeit hat an der Kommissionierzeit einen Anteil von ca. 20 bis 30 % [Vog-1997]. Die Dauer für das Greifen kann mit zwei bis zehn Sekunden pro Entnahmeeinheit [Gud-2010] angegeben werden. Die Greifzeit ist abhängig von der Gestaltung der Ablauforganisation, beispielsweise der gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Aufträge, und von den räumlichen Einflussfaktoren des Entnahmeplatzes, z. B. der maximalen und minimalen Greifhöhe, der Greiftiefe oder der Ablageentfernung. Da die Greifzeit nur den physischen Vorgang des Greifens umfasst, ist sie unabhängig von der eingesetzten Kommissioniertechnologie [Gün-2009].

Die **Totzeit** wird oft auch als Rüstzeit bezeichnet. Im Gegensatz zum Begriff Totzeit in der Regelungstechnik, der sich auf Reaktions- und Informationsverarbeitungszeiten beschränkt, umfasst die Totzeit in der Kommissionierung weitere Aspekte [Gud-2010]. Totzeiten sind dadurch definiert, dass keine äußerliche Veränderung an den Waren vorgenommen wird, d. h. der Prozessschritt ist nicht wertschöpfend [Gün-2009]. Die Totzeit umfasst beispielsweise Vorgänge wie Lesen, Aufreißen von Verpackungen, Suchen und Identifizieren, Kontrollieren, Reaktionszeiten, Belegarbeiten, Kodieren und Positionieren [Gün-2009]. Der Anteil von Totzeiten an der Kommissionierzeit kann 20 bis 30 % [Alt-2003] betragen. Der Zeitbedarf für das Suchen eines Bauteils nimmt dabei 10 % der Kommissionierzeit in Anspruch [Vol-2003]. Die Totzeit hängt bedingt durch die Informationsaufnahme und -verarbeitung der menschl-

chen Sinnesorgane in der manuellen Kommissionierung maßgeblich von der verwendeten Technologie der Informationsbereitstellung ab [Gün-2009].

2.2.3.2 Kommissionierleistung

Für die Beurteilung der Leistung eines einzelnen Kommissionierers lassen sich u. a. die Kennzahlen Kommissionierleistung und Pickleistung heranziehen. Die Kommissionierleistung ist die Anzahl der Positionen, die ein Kommissionierer pro Stunde bearbeitet. Die Pickleistung hingegen beschreibt die Anzahl der Entnahmeeinheiten, die ein Kommissionierer pro Stunde greift und ablegt. [Gud-2010]

Typische Pickleistungen verschiedener Kommissioniersysteme sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Pickleistung unterschiedlicher Kommissioniersysteme (in Anlehnung an [Jün-2000])

| Kommissioniersystem | Pickleistung [Picks/h] |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Mann-zur-Ware, papiergebunden, lange Entnahmefront, Bewegung zu Fuß | 70 bis 100 |
| Mann-zur-Ware, papiergebunden, lange Entnahmefront, Bewegung mechanisiert | 120 bis 350 |
| Mann-zur-Ware, papierlos | 300 bis 600 |
| Kommissioniernester | bis 1.000 |
| Kommissionierroboter | 100 bis 150 |
| Kommissionierautomat | bis 48.000 |

Während die Kommissionierleistung unabhängig von der Entnahmemenge pro Position ist, bezieht sich die Pickleistung auf die Anzahl der physischen Greifvorgänge, die mit der Anzahl der Entnahmeeinheiten übereinstimmt. Dabei lässt sich nicht exakt bestimmen, wie viele Greifvorgänge tatsächlich benötigt werden, um eine bestimmte Stückzahl zu kommissionieren. Aus diesem Grund wird in diesem Forschungsprojekt die auf eine Person bezogene Kommissionierleistung gemäß Formel 2-1 [Gud-2010] verwendet.

$$\text{Kommissionierleistung } g [\text{Pos/h}] = \frac{\text{Anzahl der kommissionierten Positionen}}{\text{Stunde}}$$

Formel 2-1: Berechnung der Kommissionierleistung [Pos/h]

Weitere Größen, die die Kommissionierleistung in der Praxis beeinflussen, sind die Verfügbarkeit und die Auslastbarkeit der Kommissionierer. Für die Verfügbarkeit menschlicher Kommissionierer nennt Gudehus Erfahrungswerte zwischen 80 % und 90 %, die sich an den Arbeitsbedingungen und der Belastung des Kommissionierers orientieren [Gud-2010]. Im Rahmen von kurzen Versuchsreihen, die Bestandteil des Forschungsprojekts sind, können gute Arbeitsbedingungen und eine niedrige Belastung angenommen werden [Gün-2009]. Die Verfügbarkeit wird deshalb mit 100 % angenommen. Die Auslastbarkeit hängt von der Zeit ab, während der der Kommissionierer produktiv arbeiten kann. Diese sinkt, wenn der Kommissionierer auf Nachschub oder Informationen warten muss oder beispielsweise durch andere Kommissionierer in seiner Arbeit behindert wird [Gud-2010]. Deshalb werden die Versuchsreihen dieses Forschungsprojektes so ausgelegt, dass derartige Effekte nicht zum Tragen kommen, und somit auch für die Auslastbarkeit der Wert 100 % angenommen werden kann.

Allgemein ist bei Leistungsvergleichen zu berücksichtigen, dass die Kommissionierzeit von der Auftragsstruktur, dem Kommissioniersystem, der Kapazität der Bereitstellungseinheiten und Versandeinheiten sowie von der Sortimentsbreite abhängt [Gud-2005]. Ziel der Versuchsreihen dieses Forschungsprojektes ist es, ausschließlich den Einfluss der technischen Gestaltung des Informationssystems zu bewerten. Deshalb werden alle anderen Einflussgrößen, insbesondere die Auftragsstruktur konstant gehalten. Die Kommissionierleistung eines Probanden ist also bei einer vorgegebenen Anzahl an Positionen indirekt proportional zur Kommissionierzeit (vgl. Formel 2-2).

$$\text{Kommissionierleistung } g [\text{Pos/h}] = \frac{\text{Anzahl Positionen}}{\text{Kommissionierzeit } [\text{min}]} \times 60 \text{ min/h}$$

Formel 2-2: Zusammenhang zwischen der Kommissionierleistung und der Kommissionierzeit

2.2.3.3 Kommissionierfehler

Einer der zentralen Aspekte der Kommissionierung ist die Vermeidung von Fehlern. Werden Kommissionierfehler vor der Auslieferung an den Kunden nicht mehr entdeckt und gelangen somit zum Kunden, kann dies das Kunden-Lieferanten-Verhältnis belasten und zu erheblichen finanziellen Schäden führen.

Kommissionierfehler sind auf verschiedene Fehlhandlungen zurückzuführen, die an unterschiedlichen Stellen im Kommissionierprozess vorkommen können. Nachfolgend sind einige häufig auftretende Beispiele genannt [Gud-2010]:

- Entnahme aus einer falschen Bereitstellereinheit
- Verwechslung der Artikel
- Entnahme der falschen Menge
- Ablage in den falschen Sammelbehälter
- Falsche Etikettierung
- Liegenlassen oder Vergessen einzelner Aufträge
- Zu späte Bereitstellung zum Abholen oder Versand

Die aus diesen Fehlhandlungen resultierenden Fehler können vier wesentlichen Fehlerarten zugeordnet werden. Die vier Fehlerarten und die prozentuale Häufigkeit ihres Auftretens im Kommissionierprozess sind nachfolgend genannt (vgl. [Dul-2005], [Lol-2003]):

- Typfehler (37-42 %)
- Mengenfehler (44-46 %)
- Auslassungsfehler (10 %)
- Zustandsfehler (4-7 %)

Während beim Typfehler ein falscher Artikel zusätzlich oder anstatt des richtigen Artikels kommissioniert wurde, ist beim Mengenfehler die Stückzahl des richtigen Artikels zu hoch oder zu gering. Auslassungsfehler entstehen, wenn eine gesamte Position übersprungen wurde. Der Auslassungsfehler kann auch als Sonderfall des Mengenfehlers mit der Stückzahl null interpretiert werden. Zustandsfehler sind die Folge einer falschen Tätigkeit, die an einem Artikel verrichtet wurde. Hierfür existieren verschiedene Definitionen. Häufig auftretende Beispiele sind beschädigte oder falsch verpackte Artikel sowie falsch etikettierte Artikel.

Kennzahlen zur Beschreibung der Kommissionierqualität sind die Positionsfehlerquote und die Auftragsfehlerquote. Während die Positionsfehlerquote die Relation der Anzahl fehlerhaft ausgeführter Pickpositionen zur Gesamtzahl der bearbeiteten Positionen beschreibt, entspricht die Auftragsfehlerquote dem Quotienten aus der Anzahl der Aufträge, die nicht vollständig und korrekt ausgeführt wurden, und der Gesamtzahl der Aufträge [Gud-2010].

In diesem Forschungsprojekt wird als Kennzahl die positionsbezogene Kommissionierfehlerquote verwendet. Diese lässt sich für einen Kommissionierer mit der Formel 2-3 berechnen.

$$\text{Fehlerquote } e [\%] = \frac{\text{Anzahl fehlerhafter Positionen}}{\text{Anzahl Positionen}} \times 100\%$$

Formel 2-3: Berechnung der Fehlerquote für einen Kommissionierer

Durch Probandenversuche im Rahmen des Forschungsprojektes sollen verschiedene Kommissioniertechniken für das Informationssystem, u. a. das neu zu entwickelnde fehlersichere Pick-by-Vision verglichen werden. Um eine Aussage für eine Technik treffen zu können, ist über alle Kommissionierer der Mittelwert zu bilden. Ferner ist zu beachten, dass die Fehlerquote unter Laborbedingungen höher ist als in der Praxis, da die Probanden meist unerfahren sind, und sie nur eine sehr kurze Einarbeitungszeit haben [Gün-2009]. Bei Laborversuchen von Lolling war die Fehlerquote doppelt so hoch wie in der Praxis [Lol-2003].

Die Fehlerrate liegt in der Praxis typischerweise zwischen 3.000 und 15.000 Fehler pro einer Million Positionen, was 0,3 bis 1,5 % entspricht [Fis-1994]. Dabei gilt ein Fehler pro 1.000 Positionen (0,1 %) als erstrebenswert [Gün-2009].

Die Fehlerquote hängt stark von der Realisierung eines einzelnen Kommissioniersystems ab, u. a. von der Technologie der Informationsbereitstellung (vgl. [Lol-2003], [Gün-2009]). Das Ziel der Null-Fehlerkommissionierung ist aber grundsätzlich nicht erreichbar [Gud-2005]. Tabelle 2-2 zeigt typische Fehlerraten für herkömmliche Kommissioniertechniken. Im Durchschnitt liegt die Fehlerrate bei ca. 0,4 % [Gün-2009]. Auffällig ist die hohe Fehlerquote bei den Pick-by-Light Systemen. Bei eigenen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes lag dieser Wert deutlich niedriger bei 0,13 %.

Tabelle 2-2: Fehlerquote verschiedener Kommissioniersysteme [Lol-2003]

| Informationsbereitstellung | Anzahl untersuchter Systeme | Durchschnittliche Fehlerwahrscheinlichkeit |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| Pick-by-Voice | 5 | 0,10 % |
| Beleg | 38 | 0,35 % |
| Etiketten | 7 | 0,37 % |

| | | |
|-------------------|----|--------|
| Pick-by-Light | 6 | 0,40 % |
| MDT mit Scanner | 13 | 0,36 % |
| MDT ohne Scanner | 6 | 0,69 % |
| MDT und Etiketten | 5 | 0,94 % |

2.2.4 Technologien der Informationsbereitstellung

In Abschnitt 2.2.1 wurden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten der Teilsysteme eines Kommissioniersystems dargestellt. Da die Vollständigkeit, Lesbarkeit und Anordnung der Informationen großen Einfluss auf die Totzeit und die Fehlerquote haben und sich somit direkt auf die Leistung, Qualität und Kosten eines Kommissioniersystems auswirken [Gud-2007], kommt dem Informationssystem eine besonders hohe Bedeutung zu. Hinsichtlich der Weitergabe der für die Kommissionierung relevanten Informationen können nach der VDI-Norm 3590 beleggebundene und beleglose Kommissioniersysteme unterschieden werden, die sich entsprechend Tabelle 2-3 in weitere Arten der Informationsbereitstellung unterteilen lassen. Die Arten der Informationsbereitstellung werden im Folgenden auch als Kommissioniertechniken bezeichnet.

Tabelle 2-3: Arten der Informationsbereitstellung in der Kommissionierung (in Anlehnung an [Gün-2011a])

| Informationsbereitstellung | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| beleggebunden | beleglos | |
| | mobil (online oder offline) | stationär (online) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Kommissionierliste • Lieferschein • Etikett | <ul style="list-style-type: none"> • Mobile Datenterminals • Terminal am Fördermittel • Pick-by-Voice • Pick-by-Vision | <ul style="list-style-type: none"> • Stationäre Monitore • Pick-by-Light |

Die Auftragsdaten werden aus dem WMS als Papierbelege ausgedruckt oder dem Kommissionierer mittels mobiler bzw. stationärer Terminals, Fachanzeigen (Pick-by-Light), sprachgeführter Systeme (Pick-by-Voice) oder durch das AR-unterstützte Kommissioniersystem Pick-by-Vision bereitgestellt. Auch beleglose Systeme enthal-

ten selbst zunächst keine lagerrelevanten Daten, sondern beziehen diese über Schnittstellen aus dem WMS [Spe-2004].

Kommissionierliste

Die am weitesten verbreitete Kommissioniertechnik ist die Auftragsliste aus Papier. Diese ist für den Menschen intuitiv handhabbar und die Abläufe sind sehr einfach erlernbar. [Gün-2009]

Die Kommissionierliste enthält alle für den Auftrag wichtigen Daten. Um Fehler zu vermeiden ist beim Aufbau einer Kommissionierliste darauf zu achten, dass diese übersichtlich gestaltet ist, so dass der Mitarbeiter die für den jeweiligen Prozessschritt relevanten Daten ohne großen kognitiven Aufwand identifizieren kann.

Hierfür ist es wichtig, dass sowohl die einzelnen Zeilen (beispielsweise durch farbliche Gestaltung oder durch einen ausreichend großen Abstand) als auch die einzelnen Daten einer Auftragszeile klar voneinander unterscheidbar sind. Die Daten sollten in einer Auftragszeile so angeordnet sein, dass die Reihenfolge der Prozessschritte mit der Leserichtung übereinstimmt: Links der Lagerplatz, dann die Artikelbezeichnung bzw. Artikelnummer und am Ende der Zeile die Stückzahl. In Abhängigkeit von den Anforderungen an die Kommissionierqualität, können Artikelnummer und Artikelbezeichnung weggelassen werden, da diese lediglich eine zusätzliche Angabe zur Fehlerüberprüfung darstellen. [Gün-2009]

Die Quittierung der einzelnen Positionen erfolgt oft durch Abhaken mit einem Stift. Ist der gesamte Auftrag abgeschlossen, kann dies im WMS mittels manueller Eingabe an einem Rechner vermerkt werden. Um diesen Schritt zu vereinfachen, kann zusätzlich ein Barcode auf der Liste abgedruckt sein. Durch Scannen des Barcodes mit einem Handscanner wird der Abschluss des Auftrags quittiert.

Kommissionierlisten sind sehr einfach und flexibel einzusetzen, aber sie bringen auch einige Nachteile mit sich. Die Handhabung der Liste und das Abhaken mit einem Stift schränkt den Mitarbeiter in seiner Bewegungsfreiheit ein und erhöht die Kommissionierzeit. Auch das Ablesen der Daten ist mit hohem zeitlichen Aufwand verbunden und fehleranfällig. Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus dem Umstand, dass die Datenhaltung nicht in Echtzeit erfolgt, weil die im WMS gespeicherten Daten erst nach Abschluss eines Auftrags aktualisiert werden. Sind beispielsweise

Bestandskorrekturen notwendig, werden diese oft erst nach der Auftragsbearbeitung vorgenommen, so dass eine Bestandskontrolle in Echtzeit nicht möglich ist.

Um die Nachteile der klassischen Kommissionierung mit einer Papierliste zu kompensieren, werden vermehrt beleglose Kommissionierverfahren eingesetzt. Nach Lolling kann durch beleglose Lagerprozesse gegenüber beleggebundenen Systemen die Produktivität um bis zu 30 % gesteigert und die Fehlerwahrscheinlichkeit um bis zu 30 % gesenkt werden [Lol-2003]. Allgemein liegen die Vorteile der beleglosen Kommissionierung nach [VDI3311] nicht nur in der Reduzierung der unproduktiven Zeitanteile und der Reduzierung der Fehlerquote sondern auch in der Erhöhung der Flexibilität, beispielsweise bei Eilaufträgen, und der Reduzierung der Betriebskosten, z. B. für Drucker und Papier.

Mobile Datenterminals

Ein mobiles Datenterminal (MDT) ermöglicht die Erfassung und Speicherung von Daten, ohne dabei an einen PC-Arbeitsplatz gebunden zu sein. Das System teilt dem Kommissionierer den nächsten zur Ausführung vorgesehenen Auftrag mit und zeigt ihm alle notwendigen Informationen (z. B. Lagerplatz, Artikelnummer, Auftragsnummer) im Display an. Welche Daten und Arbeitshinweise im Einzelfall bereitgestellt werden, hängt von den spezifischen Randbedingungen ab. [Gün-2009]

Die Daten können bei online-Geräten in Echtzeit erfasst und über eine drahtlose Funk- oder Infrarotverbindung mit einem zentralen Informationssystem ausgetauscht werden. Ist kein flächendeckendes Funknetz vorhanden, ist auch der Einsatz von offline-Geräten möglich, die zum Datenaustausch an eine Ladestation angeschlossen werden.

Häufig ist in einem MDT ein Scanner zum Auslesen von Barcodes integriert. Deshalb wird bei den folgenden Betrachtungen von einem MDT mit integriertem Scanner ausgegangen. Bereits beim Prozessschritt „Sammelbehälter abholen“ (vgl. Kommissionierprozess in Abschnitt 2.2.2) kann es notwendig sein, diesen zu scannen. Auch die Ankunft am Entnahmeort kann durch Scannen eines Barcodes am Lagerfach quittiert werden. Bei der Entnahme wird die Artikelnummer erfasst und überprüft. Dieser Scanvorgang kann entweder für jede einzelne Entnahmeeinheit oder nur einmalig für jede Position durchgeführt werden. Zwar sinkt durch das Scannen die Fehlerrate deutlich, jedoch erhöht sich mit jedem zusätzlichen Scanvorgang auch die Kommissionierzeit. Auch der Zeitbedarf für das Halten des Geräts bei Tastaturein-

gaben und das Lesen der Displayanzeige führt zu einer Beschränkung der Kommissionierleistung.

Um den Handhabungsaufwand beim Scannen zu reduzieren, werden auch sog. Ring- oder Fingerscanner eingesetzt, die permanent am Finger getragen werden. Hinsichtlich des Arbeitsschutzes ist allerdings der Umstand kritisch zu bewerten, dass sich diese Geräte leicht in der Regalgeometrie verhaken und zu Verletzungen führen können [Gün-2009].

Pick-by-Light

Das beleglose Kommissioniersystem Pick-by-Light (PbL) führt den Kommissionierer mittels Lämpchen und Displays. Dazu ist an jedem Lagerfach ein Lämpchen mit einem Ziffern- oder alphanumerischen Display angebracht. Eingaben in das System können mittels einer Quittierungstaste und zusätzlichen Eingabe- bzw. Korrekturtasten am jeweiligen Lagerfach vorgenommen werden.

Während eines Kommissionierauftrags wird der Nutzer durch das Aufleuchten des Lämpchens zum Lagerfach der aktuellen Position geführt. Dort angekommen, zeigt das Display die zu entnehmende Stückzahl an. Der erfolgreiche Abschluss einer Entnahme oder einer Position wird anschließend mittels einer Quittiertaste bestätigt und die Bestandsänderung in Echtzeit im WMS verbucht.

Beim Multi-Order-Picking kommt oft auch die Umkehrung des PbL-Prinzips, das sog. Put-to-Light, zur Anwendung. Dabei wird der Ablageort, beispielsweise ein Sammelbehälter an einem stationären Kommissionierarbeitsplatz oder auf einem Kommissionierwagen, durch ein Lämpchen angezeigt. [Gün-2009]

Ein wesentlicher Vorteil von PbL-Systemen ist die einfache und intuitive Werkerführung. Dies ermöglicht kurze Anlernzeiten. Da das System den optischen Sinn des Menschen anspricht, mit dem er am besten seine Umgebung wahrnimmt, wird eine schnelle Informationsaufnahme unterstützt. Allerdings erhöht sich auch der optische Suchaufwand. Die freien Hände und der parallele Ablauf von mehreren Tätigkeiten (z. B. Quittierung während des Gangs zum nächsten Fach) ermöglichen eine hohe Kommissionierleistung bei gleichzeitig geringer Fehlerquote. [Gün-2009]

Als wesentlicher Nachteil ist zu werten, dass alle Regale mit Lämpchen, Displays und Tastern ausgestattet werden müssen. Dies führt zu hohem Installationsaufwand und einer starken Einschränkung der Flexibilität hinsichtlich zukünftiger Umbaumaß-

nahmen. Da PbL-Systeme von funktionierenden Lämpchen abhängig sind, ist deren Funktionstüchtigkeit unter hohem Aufwand sicherzustellen. [Gün-2009]

Ein negativer Einfluss auf die Kommissionierqualität kann sich dadurch ergeben, dass keine Überprüfung bzw. Identifizierung der entnommenen Artikel vorgenommen wird. Dadurch dass die Quittierungstaste aus Einfachheit oft vor dem Greifen der Artikel gedrückt wird, können also Zählfehler entstehen [Ten-2005]. Weiterhin ist nachteilig zu sehen, dass die Auftragsreihenfolge sequenzbehaftet ist und pro Regalabschnitt nur ein Kommissionierer arbeiten kann [Gün-2009].

Um die Nachteile herkömmlicher PbL-Systeme zu beheben, existieren verschiedene technologische Ansätze. So werden beispielsweise die Lagerfächer mit mehreren Lämpchen in verschiedenen Farben ausgestattet, so dass gleichzeitig mehrere Kommissionierer in einer Zone verschiedene Aufträge bearbeiten können. Hinsichtlich der Fehlervermeidung können Lasersensoren in jedes Lagerfach integriert werden, die automatisch jeden Greifvorgang registrieren und somit die Funktion der Quittiertaste übernehmen [New-2003].

Pick-by-Voice

Bei der Arbeit mit dem Kommissioniersystem Pick-by-Voice (PbV) erhält der Kommissionierer alle relevanten Informationen aus dem WMS, z. B. den Lagerplatz oder die Entnahmemenge, mittels computergesteuerter Sprachausgabe über einen Kopfhörer. Die Interaktion mit dem System, z. B. die Quittierung einer Auftragsposition oder die Eingabe von Prüfziffern, erfolgen per Spracheingabe über ein am Headset befestigtes Mikrofon. Weitere Bestandteile des Systems sind ein mobiles Sprachterminal mit Tragegurt, entsprechende Software sowie ein Datenfunksystem.

Ein wesentlicher Vorteil der Technologie ist, dass der Kommissionierer beide Hände für die eigentliche Arbeitsaufgabe frei hat. Zudem wird eine niedrige Kommissionierzeit auch dadurch erreicht, dass Bewegungsabläufe und die Interaktion mit dem System innerhalb gewisser Grenzen parallel stattfinden können. So kann beispielsweise eine Entnahme quittiert werden, während die Artikel abgelegt werden. Die Sprachanweisungen unterstützen eine straffe Prozessführung und kurze Anlernzeiten [Hil-2004]. Durch die Eingabe von Prüfziffern, z. B. Nummern am Lagerfach oder die letzten Ziffern der Artikelnummer, wird eine niedrige Fehlerquote gewährleistet. Wie bei anderen beleglosen Kommissioniersystemen kann der Datenaustausch mit dem WMS in Echtzeit erfolgen.

Nachteilig wirkt sich die durch PbV entstehende Belastung aus. Die Ansage von Sprachanweisungen durch eine monotone Stimme über längere Zeit hinweg, kann zu einer geringen Akzeptanz bis hin zur Demotivation der Kommissionierer führen. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass die Kommunikation der Mitarbeiter untereinander durch PbV behindert wird und zu einer Isolation des einzelnen Kommissionierers führen kann. Neben dem subjektiven Empfinden kann sich dies beispielsweise in einem Lager mit Staplerbetrieb auch negativ auf die Arbeitssicherheit auswirken. [Gün-2009]

Zwar hat sich durch den technologischen Fortschritt (bessere Mikrofone, Unterdrückung von Störgeräuschen) das Problem der schlechten Spracherkennung in industriellen Umgebungen verbessert, dennoch kommt es immer wieder vor, dass Spracheingaben des Nutzers nicht sofort erkannt werden und zusätzlicher Zeitaufwand für die Wiederholung einer Spracheingabe entsteht.

Pick-by-Vision

Das auf der AR-Technologie basierende Kommissioniersystem Pick-by-Vision unterstützt den Kommissionierer durch die Einblendung visueller Informationen direkt in seinem Blickfeld. Dazu dient dem Kommissionierer ein HMD als ortsunabhängiges Visualisierungsmedium, über das alle für die Arbeitsaufgabe relevanten Informationen bereitgestellt werden. Als Datenhaltungssystem dient ein Warehouse Management System, das wichtige Daten wie den Lagerplatz, die Entnahmemenge und die Artikelbezeichnung zur Verfügung stellt. Diese Daten werden via WLAN (Wireless Local Area Network) auf einen mobilen Rechner übertragen, der auch als Szenengenerator fungiert und die Informationen aus dem WMS als dreidimensionale (3D) Objekte oder in Textform für die Darstellung im HMD aufbereitet.

Entsprechend der Einteilung von AR-Systemen in Abschnitt 2.1.1 kann die Informationsdarstellung eines Pick-by-Vision Systems sowohl kongruent als auch kontextabhängig erfolgen. Bei der Variante mit kongruenter Überlagerung erfolgt die Einblendung der Daten in Abhängigkeit von Ort, Zeit, betrachtetem Blickfeld und dem Stand der Auftragsbearbeitung [Gün-2009]. Hierfür ist es erforderlich, die Position des Kommissionierers und dessen Blickrichtung durch ein Trackingsystem zu ermitteln. Somit lassen sich nicht nur statische Informationen sondern auch dynamische virtuelle Objekte in Abhängigkeit von der Blickrichtung anzeigen. Beispiele hierfür sind ein sich dynamisch anpassender Tunnel zur Navigation im Lager oder eine farbige Umrandung zur Hervorhebung des Entnahme- oder Ablageortes. Abbildung 2-4

zeigt ein Pick-by-Vision System, das dem Kommissionierer mittels eines sich dynamisch anpassenden Tunnels aus Kreisen den Weg zum richtigen Lagerfach weist. Die Beschriftung des Entnahmeortes ist zusätzlich kongruent mit einem Rechteck überlagert. Die Position und Blickrichtung des Kommissionierers wird hierzu kontinuierlich von mehreren Infrarot-Trackingkameras ermittelt, die die reflektierenden Kunststoffkugeln am HMD erfassen.

Da die Verwendung eines Trackingsystems mit hohem Aufwand verbunden ist, existiert auch eine Variante von Pick-by-Vision mit kontextabhängiger Informationsdarstellung. Bei dieser Variante können nur statische Daten, beispielsweise Textinformationen, zum jeweiligen Prozessschritt der Kommissionierung (vgl. Abschnitt 2.2.2) im HMD eingeblendet werden. Die perspektivisch richtige Anzeige, z. B. die dynamische Visualisierung für die Lagernavigation, entfällt in diesem Fall.



Abbildung 2-4: Pick-by-Vision System (Bildquelle: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München)

Um in den Prozessablauf eingreifen zu können, steht dem Kommissionierer ein Interaktionsgerät zur Verfügung. Wichtige Interaktionen sind die Quittierung von Prozessschritten und das Tätigen von Eingaben, beispielsweise die Auswahl des Benutzers bei der Anmeldung am System. Mögliche Eingabegeräte sind das Touchpad am mobilen Rechner, eine Armtastatur oder die Interaktion via Spracheingabe.

Bei dem in Abbildung 2-4 gezeigten System interagiert der Kommissionierer mittels eines am Gürtel getragenen Dreh-Drückknopfes mit dem System. Durch Drücken wird ein Prozessschritt quittiert. Eingaben erfolgen in Form von Menüs, durch die der Benutzer durch Drehen navigiert.

Der Aufbau eines Pick-by-Vision Systems und die Auswahl der Komponenten ist vom jeweiligen Kommissioniersystem abhängig. Insbesondere erfolgt die Auswahl eines geeigneten Trackingsystems anhand der Größe und Beschaffenheit des Kommissionierbereiches [Gün-2009].

Bisher befinden sich noch keine Pick-by-Vision Systeme im produktiven Einsatz. Versuchsreihen mit Demonstratoren in der Forschung haben gezeigt, dass sich die Bereitstellung der Informationen direkt im Blickfeld und die optische Wegführung vorteilhaft auf die Kommissionierzeit und -qualität auswirkt [Gün-2009].

Während die Greifzeit als Zeitbedarf für den rein physischen Vorgang des Greifens nicht von der Art der Informationsbereitstellung abhängt, können die Basis-, Weg- und Totzeit durch ein Pick-by-Vision System beeinflusst werden. Die Basiszeit umfasst bei Pick-by-Vision entsprechend Abschnitt 2.2.2 im Gegensatz zur Belegkommissionierung lediglich das Holen und Abgeben der Sammelbehälter und die An- und Abmeldung vom System. Insbesondere vor dem Hintergrund kontinuierlich kleiner werdender Auftragsgrößen und somit einer höheren Bedeutung der auftragsbezogenen Basiszeit gegenüber den positionsbezogenen Zeiten Weg-, Tot- und Greifzeit [Lün-2005] ist eine niedrige Basiszeit eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Kommissionierleistung. Weiterhin kann die intuitive und kontextbezogene Bereitstellung relevanter Informationen und das gleichzeitige Anzeigen von verschiedenen Informationsarten (z. B. Weg- und Pickinformationen) die Informationsaufnahme beschleunigen und somit zu einer Reduzierung der Totzeit beitragen. Die zielgerichtete Fortbewegung im Lager, die durch eine dynamische Visualisierung zur Wegfindung unterstützt wird, ermöglicht niedrige Wegzeiten.

Die einfache Bedienbarkeit von Pick-by-Vision Systemen ermöglicht kurze Anlernzeiten, was sich vor allem beim Einsatz von Aushilfskräften oder Leiharbeitern, deren Anteil an der Belegschaft zeitweise bis zu 90 % betragen kann [Gil-2008], positiv auf die Kommissionierleistung auswirkt.

Durch die intuitive visuelle Darstellung der benötigten Informationen, beispielsweise die optische Hervorhebung des Lagerfachs zur Wegfindung im Lager, und die Mög-

lichkeit, eine Entnahmeeinheit mit der virtuellen Artikelnummer oder einem virtuellen Bild des Artikels im HMD abzugleichen, ist eine Reduzierung von Kommissionierfehlern möglich. Dies ist bereits ein erster Schritt zur Senkung der Fehlerquote in der AR-unterstützten Kommissionierung. Die Entwicklung von Konzepten zur Erweiterung des Systems im Hinblick auf eine noch niedrigere Fehlerquote bis hin zur Null-Fehler-Kommissionierung ist Gegenstand des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision II“.

3 Analyse von Kommissionierfehlern in der Praxis

Die in der Praxis auftretenden Kommissionierfehler haben unterschiedliche Ursachen und Auswirkungen. Bereits heute werden verschiedene Methoden eingesetzt, um Kommissionierfehler zu verhindern oder zumindest aufzudecken. Um die Anforderungen an die Fehlervermeidung mit der AR-Technologie definieren zu können, werden Kommissionierfehler bei Industriepartnern untersucht sowie deren Ursachen und Auswirkungen analysiert. Dies erfolgt anhand von Prozessaufnahmen, der Auswertung von statistischen Unterlagen und ausführlichen Mitarbeitergesprächen bei mehreren Industriepartnern in insgesamt zehn Kommissioniersystemen. Bei der Auswahl der Interviewpartner in den Mitarbeitergesprächen wird die unterschiedliche Sichtweise von Lagerverantwortlichen, Logistikplanern und Mitarbeitern der operativen Logistik berücksichtigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den nachfolgenden Abschnitten 3.1 bis 3.3 dargestellt.

3.1 Auswirkungen von Kommissionierfehlern

Die Auswirkungen von Kommissionierfehlern sind vielfältig. Unter anderem haben die Anforderungen von Kunden einen maßgeblichen Einfluss darauf, wie im Falle eines Kommissionierfehlers weiter vorzugehen ist. Zu den Kunden können neben Unternehmen verschiedenster Branchen auch Privatkunden sowie Fertigungsbereiche oder Filialen des eigenen Unternehmens zählen, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an die Kommissionierqualität stellen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass direkte Folgen von Kommissionierfehlern wiederum weitere negative Auswirkungen hervorrufen können. Die Vielzahl der Einflussfaktoren und die schwierige Abgrenzbarkeit von Fehlerfolgen führen dazu, dass eine allgemeingültige Formulierung von Kausalzusammenhängen nicht möglich ist. Da also keine eindeutige Zuordnung einer Auswirkung zu einer bestimmten Fehlhandlung vorgenommen werden kann, werden im Folgenden häufige Auswirkungen von Kommissionierfehlern anhand von Fallbeispielen von Projektpartnern veranschaulicht. Die Analyse dieser Fallbeispiele hat ergeben, dass die Auswirkungen von Kommissionierfehlern abhängig vom Zeitpunkt ihrer Entdeckung sind.

Fehler, die noch während des Kommissioniervorgangs vom Kommissionierer selbst entdeckt werden, sind zwar nicht kundenrelevant, verursachen aber dennoch einen

gewissen Aufwand in Form von Zeit und Kosten für deren Behebung. Dieser Aufwand steigt deutlich an, wenn Fehler erst im Rahmen einer internen Kontrolle, z. B. bei der Warenausgangskontrolle, entdeckt werden. Zur Fehlerbehebung ist es in diesem Fall erforderlich, einen neuen Kommissionierauftrag zu generieren, um die richtigen Artikel zu kommissionieren und unter Umständen falsch kommissionierte Artikel wieder einzulagern. Nach Aussagen von Projektpartnern können die Kosten hierfür bis zu 25 Euro betragen.

Verlassen fehlerhafte Lieferungen das Unternehmen, und werden diese vom Kunden entdeckt, wird dieser üblicherweise den Fehler reklamieren. Neben dem Aufwand der Reklamationsabwicklung können durch Nachlieferungen und Retouren sowie durch Preisnachlässe und Strafzahlungen weitere monetäre Belastungen für den Betreiber eines Kommissioniersystems entstehen. Werden Fehler bis zu diesem Zeitpunkt erkannt, fallen Kosten im Rahmen von ca. 210 Euro an. Längerfristig können Kommissionierfehler, die erst beim Kunden entdeckt werden, das Kunden-Lieferanten-Verhältnis stark belasten und somit auch zum Kunden- und Imageverlust führen. Gerade wenn Produktionsbetriebe Just-in-Time beliefert werden, sind die Kosten für eine Nachlieferung beispielsweise per Helikopter oder Schadensersatzzahlungen für einen Produktionsausfall nach oben hin nicht beschränkt.

Bleiben Kommissionierfehler unentdeckt, ist mit den schwerwiegendsten Folgen zu rechnen. Unter der Annahme, dass ein falsches Bauteil in einer Maschine oder einem Fahrzeug eingebaut wird, besteht die Gefahr, dass Maschinen zerstört oder sogar die Gesundheit und das Leben von Menschen gefährdet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Kommissionierfehler hohe Kosten verursachen und das Kunden-Lieferanten-Verhältnis stark belasten können. Deshalb ist es Ziel dieses Forschungsprojektes, Konzepte für ein fehlersicheres Pick-by-Vision System zu entwickeln, mit dem sich Kommissionierfehler präventiv verhindern bzw. möglichst frühzeitig erkennen und beheben lassen.

3.2 Ursachen von Kommissionierfehlern

Im Rahmen der Untersuchung von zehn Kommissioniersystemen und den hierfür durchgeführten Prozessaufnahmen, Interviews sowie der Auswertung statistischer Unterlagen konnten wesentliche Ursachen von Kommissionierfehlern identifiziert werden. Durch die Verschiedenartigkeit der untersuchten Kommissionierprozesse

wurde auch eine Vielzahl unterschiedlicher Ursachen festgestellt, die nicht zwangsläufig bei jedem Kommissioniersystem auftreten. In der Literatur werden verschiedene Kriterien zur Klassifizierung von Fehlerursachen genannt (vgl. [Lol-2003], [Wap-2006]). Die ermittelten Ursachen können den folgenden Kriterien zugeordnet werden:

- Mensch
- Methode
- Umfeld/Milieu
- Sonstiges

Während unter dem Kriterium „Mensch“ die Ursachen zusammengefasst werden, die auf Eigenschaften des Menschen zurückzuführen sind, umfasst die „Methode“ Fehlerursachen, die sich durch die Gestaltung des Prozesses und die verwendeten Hilfsmittel ergeben. Das „Umfeld“ ist geprägt durch Umweltbedingungen und Faktoren wie der Gestaltung des Lagers. „Sonstiges“ umfasst alle Aspekte, die sich nicht den anderen drei übergeordneten Kriterien zuordnen lassen. Im Folgenden werden die Ursachen jeder der vier Fehlarten Mengen-, Typ-, Auslassungs- und Zustandsfehler erläutert. Bei der Klassifizierung der Kriterien ist zu beachten, dass sich einzelne Einflussfaktoren auf die Fehlerentstehung nicht immer eindeutig voneinander abgrenzen lassen. Außerdem resultieren Fehler oft aus einer Verkettung von Ereignissen, die demnach nicht immer einzeln betrachtet werden können.

Mengenfehler

Die wesentlichen Ursachen von Mengenfehlern sind in Abbildung 3-1 zusammengefasst. Von vielen Logistikverantwortlichen und Kommissionierern wird der Mensch als wesentliche Fehlerquelle gesehen. Unachtsamkeit führt oftmals dazu, dass sich der Kommissionierer in Abhängigkeit von der angewandten Methode der Stückzahlermittlung verschätzt oder verzählt. In Abhängigkeit von Art der Informationsbereitstellung kann es vorkommen, dass beispielsweise die zu entnehmende Stückzahl falsch von einer Kommissionierliste abgelesen wird, oder die Sprachausgabe eines PbV-Systems falsch verstanden wird. Unterstützt wird dieser Effekt durch den meist hohen Zeitdruck.

Neben der Unachtsamkeit führt auch der falsche Umgang mit dem Kommissioniersystem zu Fehlern. Unabhängig vom eingesetzten Kommissioniersystem entstehen

oftmals Fehler, wenn der Kommissionierer einen oder mehrere Prozessschritte bereits quittiert, bevor er diese ausgeführt hat. Besonders bei PbL- und PbV-Systemen werden oft eine oder sogar mehrere Positionen quittiert, bevor diese tatsächlich kommissioniert wurden. Dabei kann es vorkommen, dass der Kommissionierer sich nicht mehr an die richtige Entnahmemenge erinnert und dadurch die falsche Anzahl entnimmt. Dieser Effekt ist oft mit dem Lagerlayout gekoppelt. Wenn beispielsweise in engen Stichgängen kommissioniert werden muss, und dabei der Kommissionierwagen im Hauptgang stehen gelassen wird, versuchen Kommissionierer gelegentlich, alle Positionen in einem Stichgang auf einmal zu kommissionieren und quittieren diese im Voraus. Neben Unachtsamkeit und der bewussten vorzeitigen Quittierung ist unter dem Kriterium Mensch auch Diebstahl, insbesondere von hochwertigen Artikeln, als Ursache für fehlende Artikel zu nennen.

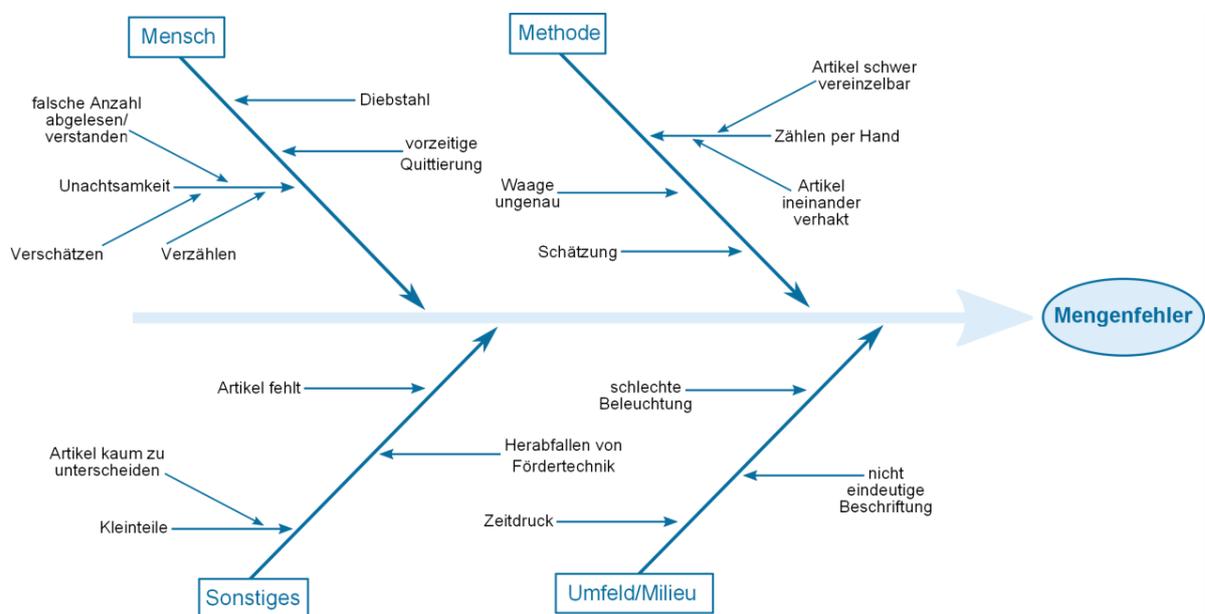


Abbildung 3-1: Ursachen von Mengenfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a])

Besonders wenn unverpackte Einzelteile zu kommissionieren sind, treten Fehler häufig dann auf, wenn diese sehr klein sind oder sich bedingt durch ihre Form leicht verhaken. Da das Zählen per Hand und insbesondere das Schätzen der Stückzahl auch von der Aufmerksamkeit des Kommissionierers abhängt, kann die Stückzahl auch durch Wiegen anstatt durch Zählen per Hand ermittelt werden. Vor allem bei hohen Stückzahlen sehr kleiner Artikel oder Artikel, die schwer vereinzelbar sind, beispielsweise weil sie sich leicht ineinander verhaken, kommt das Zählwiegen zum Einsatz. Jedoch treten bei mehreren Unternehmen aufgrund von hohen Fertigungstoleranzen der Artikel und ungenauen Waagen auch bei dieser Methode Mengenfehler auf. Bei sehr leichten Artikeln können bereits Schmierfettablagerungen und

Schmutz sowie Feuchtigkeit in Kartonverpackungen zu Fehlern führen. Im Einzelfall wird bei der Ermittlung der Stückzahl sogar bewusst eine Mehrmenge in Kauf genommen, da der Zeitaufwand für ein genaueres Verfahren sich negativ auf die Kommissionierleistung auswirkt.

Neben dem Zeitdruck lassen sich unter dem Kriterium Umfeld/Milieu weitere Einflussfaktoren auf die Entstehung von Mengenfehlern nennen. So können beispielsweise ungünstige Lichtverhältnisse und eine schlechte Beleuchtung dazu führen, dass insbesondere kleine Artikel nicht richtig abgezählt werden können oder Informationen von Kommissionierbelegen falsch abgelesen werden. Auch bei einer ausreichenden Beleuchtung können Missverständnisse entstehen, wenn eine Information auf der Liste oder die Beschriftung eines Lagerfachs nicht eindeutig ist.

Das Kriterium Sonstiges umfasst neben dem Einfluss von Kleinteilen auch die Entstehung von Mengenfehlern durch das Fehlen von Artikeln im Entnahmefach. Dies ist u. a. auf Schwachstellen in der Nachschubdisposition sowie der Informationsverarbeitung zurückzuführen. Ein häufig genanntes Problem hinsichtlich der Informationsverarbeitung ist, dass Artikel im WMS bereits ab dem Zeitpunkt als verfügbar gelten, wenn sie am Wareneingang erfasst werden. Auch wenn die Artikel noch nicht in die zugehörigen Lagerfächer eingelagert sind, können Aufträge freigegeben werden, die entsprechende Artikel enthalten. Auch wenn ein falscher Artikel in ein Lagerfach eingelagert wurde, und dies vom Kommissionierer erkannt wird, entstehen Mengenfehler. In jedem Fall bedeutet dies jedoch für den Kommissionierer, dass er nicht die geforderte Stückzahl nicht entnehmen kann. In einigen Kommissioniersystemen erfolgt der Transport der kommissionierten Ware über Stetigförderer. Hierbei kann es vorkommen, dass Artikel von der Fördertechnik herabfallen und eine zu geringe Stückzahl am Abgabeort festgestellt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Häufigkeit eines Mengenfehlers primär von der Aufmerksamkeit des Kommissionierers und den eingesetzten technischen Hilfsmitteln abhängt. Einen wesentlichen Einfluss hat dabei auch der Zeitdruck.

Typfehler

Auch hinsichtlich der Entstehung von Typfehlern ist der Mensch der wesentliche Einflussfaktor (vgl. Abbildung 3-2). Die Unachtsamkeit des Kommissionierers ist ein Grund dafür, dass er in das falsche Lagerfach greift und dadurch den falschen Arti-

kel entnimmt. Bereits auf dem Weg zum Entnahmeort kann es zu einer Verwechslung der Gasse bzw. bei mehrgeschossigen Lägern auch zu einer Verwechslung der Ebene kommen. Vergleicht der Kommissionierer dann unmittelbar vor der Entnahme nur noch den sich in allen Bereichen des Lagers wiederholenden Teil der Lagerfachbeschriftung, so erfolgt die Entnahme schließlich aus dem falschen Lagerfach. Auch wenn der Kommissionierer die Entnahme aus dem richtigen Lagerfach durchführt, können Typfehler entstehen, wenn bereits bei der Einlagerung der Artikel Lagerfächer verwechselt wurden, und deshalb der falsche Artikel im Entnahmefach liegt. Da die eigentliche Ursache der so entstandenen Fehler im Rahmen einer Qualitätskontrolle meist nicht bekannt ist, werden diese üblicherweise den Kommissionierfehlern zugerechnet.

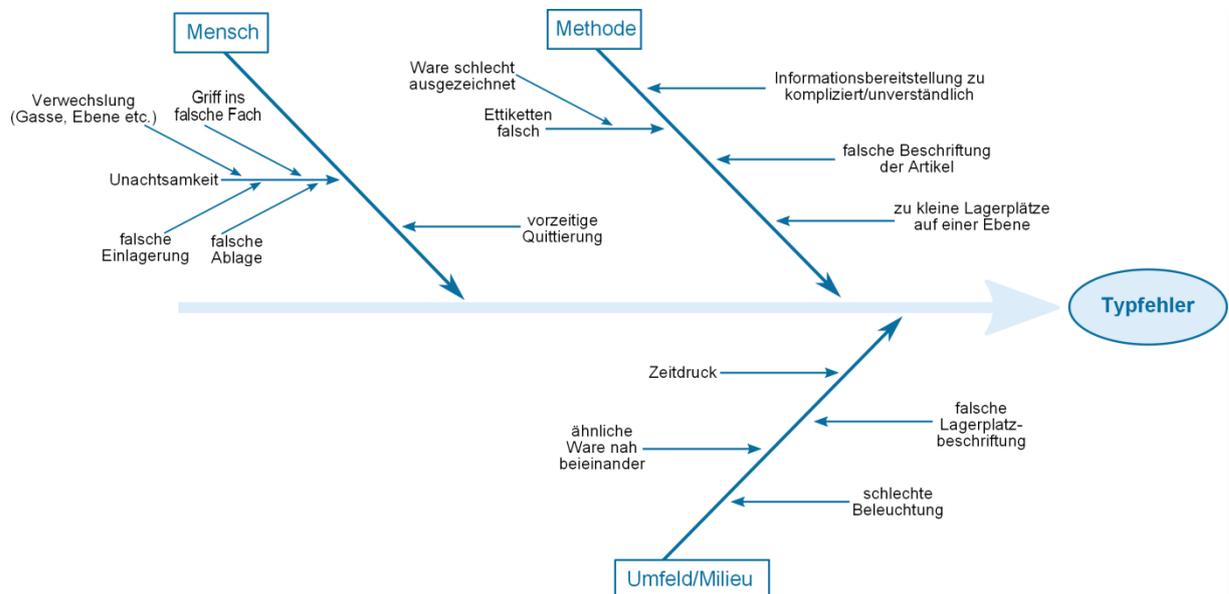


Abbildung 3-2: Ursachen von Typfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a])

Beim Multi-Order-Picking kann es analog zur Verwechslung des Lagerfachs bei der Entnahme vorkommen, dass die Ablage in einen falschen Sammelbehälter erfolgt.

Die Art der Informationsbereitstellung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entstehung von Typfehlern. Erfolgt die Darstellung der Information zu kompliziert, beispielsweise durch sehr lange Zeichenketten oder Sprachausgaben, können Missverständnisse auftreten. Zusätzlich erschweren Sprachbarrieren die richtige Aufnahme der Sprachausgabe eines PbV-Systems durch den Kommissionierer. Auch die vorzeitige Quittierung einer oder mehrerer Positionen ist eine wesentliche Ursache bei der Entstehung von Mengenfehlern. Auch Typfehler lassen sich darauf zurückführen, dass zunächst mehrere Positionen im Voraus quittiert und anschließend die Ent-

nahmefächer verwechselt werden. Eine weitere Ursache von Typfehlern ist die falsche Beschriftung oder Etikettierung von Artikeln. Verbleiben beispielsweise beim Umetikettieren die vorhandenen Etiketten auf den Artikeln, und werden die neuen Etiketten nicht ordentlich darüber geklebt, dann ist es für den Kommissionierer schwierig, das richtige Etikett zu identifizieren. In der Praxis werden vorhandene Lagerfächer in einem Kommissionierlager häufig weiter aufgeteilt, um eine große Anzahl an Artikeln auf engem Raum lagern zu können. Die einzelnen Lagerfächer werden dadurch sehr klein und die Artikel können leicht versehentlich in ein benachbartes Lagerfach verschoben werden. Dies entspricht im Grunde einer falschen Einlagerung und ist ebenfalls als potenzielle Ursache für die Entstehung von Typfehlern zu sehen.

Einflussfaktoren, die aus dem Umfeld resultieren können, sind Zeitdruck, schlechte Beleuchtung, die fehlende räumliche Trennung ähnlicher Artikel und falsche Lagerfachbeschriftungen. Insbesondere, wenn beispielsweise aufgrund einer Auftragspitze der Zeitdruck zunimmt, neigen Kommissionierer verstärkt dazu, auf sämtliche Überprüfungen, beispielsweise ob der richtige Artikel in einem Lagerfach liegt, zu verzichten und vorzeitig zu quittieren. Eine unzureichende Beleuchtung erschwert das Erkennen von falschen Artikeln oder Lagerfächern sowie die Identifizierung des richtigen Ablagebehälters. Dies trägt zusätzlich zur Entstehung von Typfehlern bei. Eine wesentliche Bedeutung für die Entstehung von Typfehlern hat auch die Lagerplatzbelegung. So wird verstärkt in ein falsches Fach gegriffen, wenn ähnliche Artikel direkt nebeneinander gelagert werden. Auch die falsche Beschriftung von Lagerplätzen führt zur Entstehung von Typfehlern. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang die Umstrukturierung eines Lagers kritisch zu sehen, wenn Lagerfachbeschriftungen nicht dem aktuellen Stand angepasst werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Entstehung von Typfehlern vor allem von der Aufmerksamkeit des Kommissionierers abhängt. Einen wesentlichen Einfluss haben auch der Aufbau des Lagers, die Belegungsstrategie und die eingesetzte Technik der Informationsbereitstellung.

Auslassungsfehler

Auch die Entstehung von Auslassungsfehlern hängt wesentlich vom Faktor Mensch ab. Aus Unachtsamkeit kann es bei der Belegkommissionierung vorkommen, dass eine komplette Auftragszeile übersprungen wird (vgl. Abbildung 3-3). Obwohl beleglose Systeme, wie z. B. Pick-by-Voice, oftmals eine positionsweise Auftragsbearbei-

tung erzwingen, können auch bei dieser Methode Auslassungsfehler entstehen, wenn der Kommissionierer bereits mehrere Positionen im Voraus quittiert und anschließend eine Position vergisst.

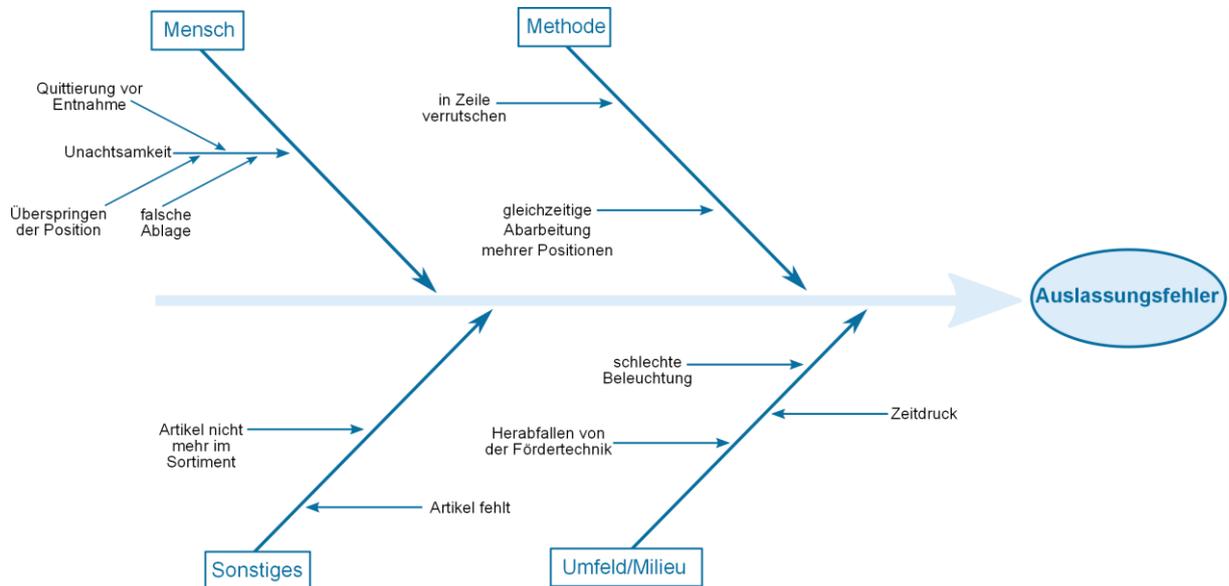


Abbildung 3-3: Ursachen von Auslassungsfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a])

Wie beim Mengen- und Typfehler begünstigen Zeitdruck und schlechte Beleuchtung auch die Entstehung von Auslassungsfehlern.

Wie bereits im Zusammenhang mit anderen Fehlerarten erläutert, können beim Multi-Order-Picking Ablagefehler auftreten. In Abhängigkeit davon, welche Stückzahl des richtigen oder falschen Artikels dabei in einen Behälter abgelegt wird, liegen in einem oder mehreren Sammelbehältern Typ-, Mengen- und/oder Auslassungsfehler vor. Definitionsgemäß fehlt im betrachteten Sammelbehälter eine komplette Position, wenn ein Auslassungsfehler vorliegt.

Analog zum Mengenfehler können Probleme innerhalb des Nachschubprozesses, Schwachstellen im Informationsfluss oder Fehler bei der Einlagerung dazu führen, dass das Entnahmefach zum Zeitpunkt der Entnahme leer ist. Eine weniger häufig auftretende Fehlerursache unter dem Kriterium Sonstiges kann beispielsweise bei der Umstellung des Sortiments auftreten. So kann es vorkommen, dass Aufträge freigegeben werden, obwohl ein Artikel nicht mehr vorhanden ist, wenn die Stamm- oder Bestandsdaten im WMS fehlerhaft sind. Beim Transport der gesammelten Artikel mittels Stetigförderern kann es vorkommen, dass Artikel von der Fördertechnik fallen. In dem Fall, dass kein Artikel einer Position das Ziel erreicht, handelt es sich um einen Auslassungsfehler.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auch für die Entstehung von Auslassungsfehlern der Mensch als wesentliche Fehlerursache gesehen wird. Die eingesetzte Art der Informationsbereitstellung und das Umfeld sind weitere wichtige Einflussfaktoren.

Zustandsfehler

In der industriellen Praxis wird die Bedeutung des Zustandsfehlers deutlich geringer bewertet als die der drei anderen Fehlerarten. Dies zeigt sich auch daran, dass Zustandsfehler oftmals nicht dokumentiert werden. In Abschnitt 2.2.3.3 wird darauf hingewiesen, dass es verschiedenste Ausprägungen von Zustandsfehlern gibt, die stark vom einzelnen Prozess abhängen. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden als Zustandsfehler die Beschädigung eines Artikels oder dessen Verpackung, während des Kommissionierens falsch aufgebrachte Etiketten oder im Rahmen eines Pick-und-Pack-Prozesses falsch verpackte Artikel berücksichtigt.

Das Auftreten von Zustandsfehlern hängt maßgeblich von der Sorgsamkeit des Kommissionierers im Umgang mit den Artikeln ab, d. h. der Mensch beeinflusst den Zustand der Entnahmeeinheiten (vgl. Abbildung 3-4). Besonders kritisch hinsichtlich der Beschädigung von Artikeln sind die Prozessschritte Entnahme und Ablage. Aus Unachtsamkeit kann es geschehen, dass beispielsweise eine Kollision zwischen Artikel und dem Lagergestell verursacht, Artikel fallengelassen oder bei unvorsichtiger Ablage im Sammelbehälter beschädigt werden.

Auch beim Transport der gesammelten Artikel besteht die Gefahr von Beschädigungen, allerdings ist dies von der Transportmethode abhängig. Beim Transport in einem Sammelbehälter kann es vorkommen, dass unten liegende Artikel gequetscht werden, wenn sich zu viele Artikel im Sammelbehälter befinden. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn druckempfindliche Artikel zuerst kommissioniert wurden. Werden für den Transport der kommissionierten Ware Stetigförderer eingesetzt, so können Beschädigungen auftreten, wenn Artikel untereinander bzw. mit der Fördertechnik kollidieren oder von der Fördertechnik fallen.

Die Zustandsfehler falsche Verpackung und falsche bzw. fehlende Etikettierung können ebenfalls der Unachtsamkeit des Kommissionierers zugerechnet werden. In dem Fall, dass beispielsweise eine erforderliche Verpackung prozessbedingt nicht vorhanden ist, ist auch eine Betrachtung unter dem Kriterium Sonstiges möglich.

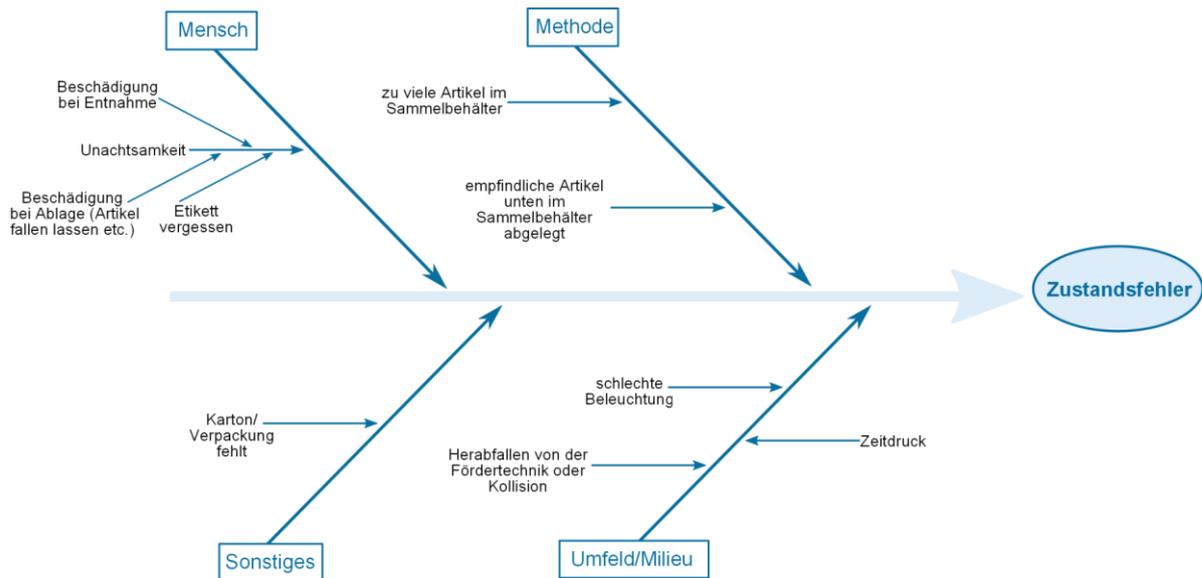


Abbildung 3-4: Ursachen von Zustandsfehlern (in Anlehnung an [fmi-2011a])

Analog zu den anderen Fehlerarten hängt auch die Entstehung von Zustandsfehlern von Einflussfaktoren des Umfelds ab. So begünstigen beispielsweise Zeitdruck und schlechte Beleuchtung die Entstehung von Zustandsfehlern. Insbesondere hoher Zeitdruck kann dazu führen, dass Artikel weniger sorgsam behandelt und dadurch beschädigt werden.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass Zustandsfehler, die während der Kommissionierung entstehen, hauptsächlich auf den sorglosen Umgang von Kommissionierern zurückzuführen sind und durch ungünstige Einflüsse seitens des Umfeldes begünstigt werden.

3.3 Maßnahmen zur Fehlervermeidung

In den vorangegangenen Abschnitten 3.1 und 3.2 wurden die negativen Auswirkungen und die Ursachen von Kommissionierfehlern aufgezeigt. Um diesen entgegenzuwirken werden von den Projektpartnern verschiedene Maßnahmen der Fehlervermeidung angewandt, die im Folgenden beschrieben sind. Diese lassen sich in Abhängigkeit von der Art der Maßnahme, den vier folgenden Bereichen zuordnen:

- Organisation
- Motivation
- Prozess
- Technik

In der Praxis ist für die wirkungsvolle Fehlervermeidung ein Maßnahmenpaket abzustimmen, das Maßnahmen aus allen vier Bereichen enthält. Auch wenn der Bereich Technik im Fokus dieses Forschungsprojektes liegt, werden zur Abgrenzung nachfolgend zunächst einige Beispiele aus den drei anderen Bereichen genannt. Eine Maßnahme hinsichtlich der **Organisation** ist die Belegung von Lagerfächern. So ist beispielsweise darauf zu achten, dass ähnliche Artikel nicht in Lagerfächern direkt nebeneinander liegen sollen, um die Verwechslungsgefahr zu reduzieren. Eine weitere Maßnahme ist die Übertragung von Verantwortung über die eigentliche Kommissionierung hinaus. Durch derartige Maßnahmen kann auch die **Motivation** der Mitarbeiter gefördert werden. Unterstützt wird dieser Effekt durch Qualifizierungs- und Schulungsmaßnahmen. Auch ein Entgeltsystem mit leistungsabhängigen Komponenten, beispielsweise einer Prämie für eine niedrige Fehlerquote bei gleichzeitig hoher Kommissionierleistung, wirkte sich bei einigen Projektpartnern positiv auf die Motivation der Mitarbeiter aus.

Für die Gestaltung des **Prozesses** stehen vielfältige Maßnahmen zu Verfügung, die oft mit dem Einsatz technischer Hilfsmittel verbunden sind. Beispielsweise kann an verschiedenen Stellen des Kommissionierprozesses eine Überprüfung von vorangegangenen Prozessschritten durchgeführt werden. Ein großer Anteil der im Projektbegleitenden Ausschuss (PA) vertretenen Betreiber von Kommissioniersystemen prüft beispielsweise durch Scannen oder Wiegen im Rahmen einer Warenausgangskontrolle, ob bei der vorangegangenen Kommissionierung Fehler aufgetreten sind. Dies kann in Form von Stichproben oder einer 100 %-Kontrolle erfolgen. Ein weiteres Beispiel stellt die Etiketten-Kommissionierung, eine Sonderform der Belegkommissionierung dar. Statt einer Papierliste erhält der Kommissionierer einen Bogen mit Etiketten. Bei jeder Entnahme wird das entsprechende Etikett vom Bogen abgelöst und auf die Entnahmeeinheit geklebt. Das Verfahren ermöglicht somit die artikelweise Quittierung und reduziert die Gefahr von Mengenfehlern.

Ziel des Forschungsprojektes Pick-by-Vision II ist es, technische Lösungen zu entwickeln, die bereits während der eigentlichen Kommissionierung zur Vermeidung von Kommissionierfehlern beitragen. Deshalb werden nachfolgend ausschließlich Maßnahmen aus dem Bereich **Technik** und deren Rückwirkung auf die Prozessgestaltung berücksichtigt.

Bereits bei der konventionellen Belegkommissionierung existieren mehrere Ansatzpunkte für die Fehlervermeidung mit einfachen technischen Mitteln. So kann durch

Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2.4 genannten Grundsätze für eine übersichtlich gestaltete Kommissionierliste die Informationsaufnahme erleichtert und somit die Gefahr von Fehlern verringert werden. Auch wenn das Abhaken mit einem Stift einen zusätzlichen Handhabungsschritt darstellt, wird durch diese Art der Quittierung zusätzlich die Gefahr eines Auslassungsfehlers deutlich reduziert.

Um eine niedrigere Fehlerquote zu erreichen, werden heute verstärkt beleglose Kommissioniersysteme eingesetzt. So ermöglichen Pick-by-Voice, Pick-by-Light und MDTs, aus der Vielzahl der alphanumerischen Informationen einer papiergebundenen Kommissionierliste nur die tatsächlich benötigte Information für die Bearbeitung einer Position bereitzustellen und den Auftrag schrittweise zu bearbeiten. Abbildung 3-5 zeigt, dass die Fehlerquote der im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Pick-by-Light und Pick-by-Voice Systeme deutlich unter der klassischen Kommissionierung mit einer Papierliste liegt.

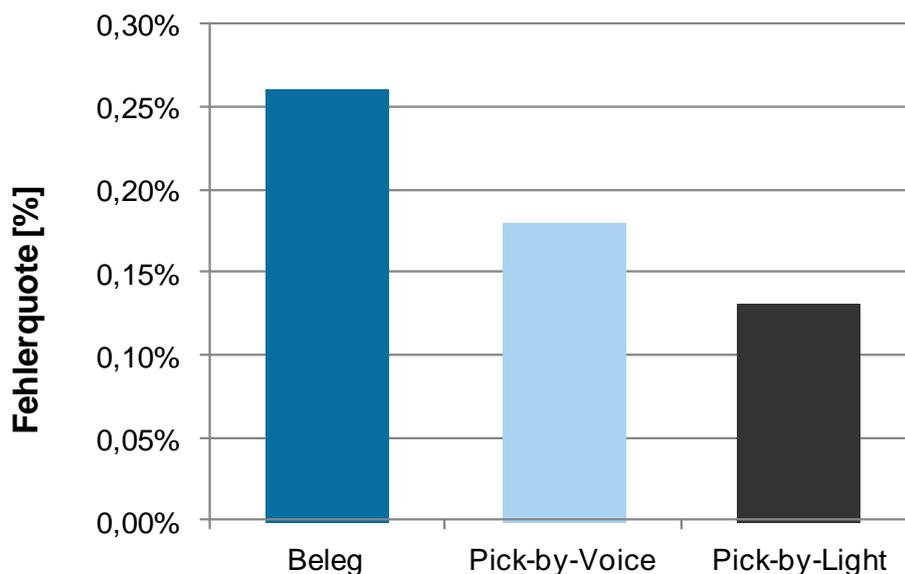


Abbildung 3-5: Fehlerquote unterschiedlicher Kommissioniertechnologien

Insbesondere die intuitive optische Anzeige von Informationen wirkt bereits präventiv gegen einen Fehlgriff in das falsche Lagerfach. Da der Mensch über 80 % der Information über den optischen Sinneskanal aufnimmt [Wei-2004], ist davon auszugehen, dass die visuelle Informationsdarstellung eine einfache und fehlerfreie Informationsaufnahme unterstützt. Ein Vergleich der Anteile der Fehlerarten bei Pick-by-Light und der Belegkommissionierung bestätigt, dass bei Pick-by-Light Systemen deutlich weniger Typfehler auftreten (vgl. Abbildung 3-6).

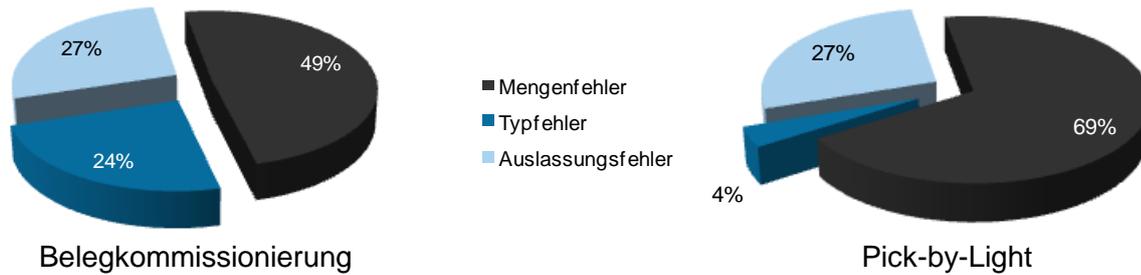


Abbildung 3-6: Anteile der Fehlerarten bei der Belegkommissionierung und bei Pick-by-Light

Unabhängig davon, ob die Quittierung eines Prozessschrittes, z. B. das Abschließen einer Entnahme oder einer Position, per Spracheingabe (PbV) oder durch das Betätigen eines Tasters (PbL) erfolgt, reduziert jeder zusätzliche Interaktionsschritt die Gefahr, eine Position zu überspringen und trägt somit zur Reduktion von Auslassungsfehlern bei. Zusätzlich kann z. B. bei PbV-Systemen durch die Spracheingabe von Prüfziffern kontrolliert werden, ob die richtige Menge oder der richtige Artikel entnommen wurden. Als Prüfziffern werden beispielsweise am Lagerplatz angebrachte Nummern oder die letzten Ziffern der Artikelnummer verwendet.

Obwohl ein zusätzlicher Schritt der Quittierung bereits dazu beitragen kann, dass der Kommissionierer nochmals kurz reflektiert, ob er tatsächlich den richtigen Artikel oder die richtige Stückzahl entnommen hat, bleibt der Mensch als wesentliche Fehlerursache erhalten. Der Einsatz von Identensystemen kann diesen Nachteil kompensieren, indem eine Kontrolle von Prozessschritten während oder im Anschluss an die Kommissionierung vorgenommen wird. Eine gängige Methode ist der Einsatz von Barcodescannern. Neben Handscannern existieren auch Bauformen, die im Gehäuse von MDTs integriert sind. Seltener werden Ring- bzw. Fingerscanner eingesetzt.

In Abhängigkeit von den Anforderungen an das einzelne Kommissioniersystem wird der Barcode eines Sammelbehälters, eines Lagerfachs oder des ersten bzw. jeden Artikels einer Position gescannt, und somit ein wirkungsvoller Schutz gegen Auslassungs-, Typ- und/oder Mengenfehler erzielt. Bei der Auswahl einer geeigneten Prüfstrategie darf allerdings nicht der Zeitaufwand vernachlässigt werden, der für jeden zusätzlichen Handhabungsschritt anfällt. Ein von Lolling [Lol-2003] durchgeführter Vergleich zeigt, dass in Kommissioniersystemen, in denen MDTs eingesetzt werden, mit Scanner eine um 48 % niedrigere Fehlerquote erreicht wurde als ohne Scanner (vgl. Tabelle 2-2, Seite 20). Dies setzt jedoch voraus, dass entsprechende Codes vorhanden sind. Gerade bei der Kommissionierung von Kleinteilen ist diese Voraussetzung meist nicht gegeben.

Deshalb muss in diesem Fall auf andere Identtechniken zurückgegriffen werden. Häufig werden Waagen eingesetzt, die neben einer Erleichterung beim Zählen hoher Stückzahlen auch eine Kontrollfunktion bieten. Die Verfügbarkeit der Artikelgewichte im WMS und ein Sortiment mit ausreichenden Gewichtsunterschieden der Artikel vorausgesetzt – ist auch beim Kontrollwiegen eine Reduktion von Auslassungs-, Mengen- und Typfehlern möglich.

Eine weitere Möglichkeit zur Fehlerreduktion, insbesondere von Typfehlern, ist die Überprüfung, ob der Kommissionierer bei der Entnahme in das richtige Lagerfach gegriffen hat. Technisch kann dies z. B. durch Lichtgitter oder Laserscanner realisiert werden, die die Regalfront überwachen. Eingesetzt werden derartige Systeme in Verbindung mit PbL. (vgl. [Wot-2012], [Wen-2011], [Ced-2012])

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bereits heute eine Vielzahl unterschiedlicher technischer Hilfsmittel zur Verfügung steht, um die Gefahr von Kommissionierfehlern zu reduzieren. Ein Nachteil bisheriger Ansätze zur Fehlervermeidung ist, dass jeder zusätzliche Quittier- oder Prüfvorgang auch mit einem zusätzlichen Handhabungsschritt und somit der Erhöhung der Kommissionierzeit einhergeht. Außerdem bleibt der Mensch, beispielsweise bei der eigenverantwortlichen Eingabe von Prüzziffern, als Fehlerquelle erhalten. Durch Clustern der bisher eingesetzten technischen Hilfsmittel der Fehlervermeidung in der manuellen MzW-Kommissionierung anhand ihrer Funktionsweise lassen sich die drei folgenden Wirkprinzipien ableiten:

- Intuitive Informationsbereitstellung
- Schrittweise Auftragsbearbeitung durch Quittierungsschritte
- Überprüfung relevanter Prozessschritte durch den Einsatz von Auto-Ident-Technologien

Während die ersten beiden Wirkprinzipien in bestehenden Pick-by-Vision Systemen bereits Anwendung finden, wird im Forschungsprojekt Pick-by-Vision II mit dem Einsatz von Auto-Ident-Technologien ein neuer Aspekt aufgegriffen.

4 Einsatzszenarien und Anforderungen

Unterschiedliche Kommissionierszenarien erfordern jeweils andere Konfigurationen des Pick-by-Vision Systems. Deshalb werden im Folgenden verschiedene Einsatzszenarien vorgestellt und anschließend die Anforderungen an ein fehlersicheres Pick-by-Vision System genannt.

4.1 Einsatzszenarien

Die Definition von Einsatzszenarien basiert auf der Untersuchung von zehn Kommissioniersystemen bei Projektpartnern und den im Rahmen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ erarbeiteten Einsatzszenarien.

Der Einsatz von Pick-by-Vision ist in vielfältigen Kommissionierszenarien denkbar. Deshalb wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ zehn typische Kommissioniersysteme hinsichtlich ihres Potenzials für den Einsatz eines AR-unterstützten Kommissioniersystems untersucht. Die betrachteten Kommissioniersysteme unterscheiden sich zum einen durch die Ausprägung der Teilsysteme Organisations-, Materialfluss- und Informationssystem entsprechend der VDI-Richtlinie 3590. Zusätzlich wurden die ausgewählten Systeme anhand der Einflussfaktoren Lagerstruktur, Sortiment und Auftragsstruktur sowie der Kommissionierstrategie genauer spezifiziert und zu Einsatzszenarien weiterentwickelt. Es zeigte sich, dass drei Szenarien ein hohes Potenzial für den Einsatz von Pick-by-Vision aufweisen. Es handelt sich dabei um ein Kommissioniernest, ein großes Kommissionierlager mit einer hohen Anzahl an Gassen und einen stationären Kommissionierarbeitsplatz nach dem Bereitstellprinzip Ware-zum-Mann. [Gün-2009]

Der Funktionsumfang des im Rahmen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ betrachteten AR-unterstützten Kommissioniersystems ist auch ein Teil des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems. Deshalb dienen die drei ausgewählten Szenarien auch als Grundlage für die Weiterentwicklung von Einsatzszenarien für das Forschungsprojekt „Pick-by-Vision II“. Zusätzlich sind im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision II“ die Anforderungen des zu entwickelnden Mechanismus der Fehlerüberprüfung zu berücksichtigen, insbesondere hinsichtlich des Einsatzes von Ident- und Tracking-Technologien. Hierfür werden die folgenden Kriterien berücksichtigt:

Lagerstruktur

Das Kriterium Lagerstruktur umfasst u. a. die Größe des Lagers. Ist beispielsweise ein Lager mit Sensoren eines Ident-, Mess- oder Trackingsystems und zugehöriger Verkabelung etc. auszustatten, steigen die Kosten – sofern das System überhaupt die entsprechende Skalierbarkeit aufweist – linear mit der Anzahl der Lagerfächer an. Auch die Art der Bereitstellung ist relevant für den Einsatz eines Trackingsystems, denn Trackingsysteme erfordern definierte räumliche Beziehungen. Während die Position und die Abmessungen eines Lagerfachs eines Fachboden- oder Durchlaufregallagers eindeutig zu bestimmen und in einem Geometriemodell abbildbar sind, ist dies bei der Bereitstellung der Ware auf Paletten nicht ohne Weiteres möglich.

Sortiment

Wesentlich für den Einsatz von Identifikationssystemen ist neben der Lagerstruktur auch die Artikelstruktur. Als Ausblick auf Abschnitt 5.2 sei an dieser Stelle erwähnt, dass im Rahmen des Forschungsprojektes insbesondere der Einsatz der Wägetechnik sowie verschiedener optischer und elektromagnetischer Identifikationsverfahren zur Fehlererkennung untersucht werden soll. Hierfür ist es erforderlich, dass die Artikel so beschaffen sind, dass durch die jeweilige Technik deren Stückzahl und/oder Identität bestimmt werden kann. Relevant für die Auswahl der geeigneten Identifikationstechnik sind Eigenschaften wie die Größe, das Gewicht, die Form, die Formstabilität und das Material eines Artikels bzw. dessen Verpackung. Beispielsweise sind Kleinteile wie Schrauben oder Sicherungsringe nicht für die optische Identifikation mittels Barcodescanner geeignet. Zusätzlich neigen einige Artikel, z. B. Sicherungsringe, durch ihre Form sich ineinander zu verhaken und dadurch die Handhabung und Vereinzelung zu erschweren. Metallische Werkstoffe können sich beispielsweise dann als problematisch erweisen, wenn die Erkennung eines Artikels durch ein elektromagnetisches Identifikationsverfahren erfolgen soll. Erschwert wird die Entwicklung eines geeigneten Mechanismus der Fehlerüberprüfung zusätzlich, wenn das Sortiment sehr inhomogen hinsichtlich einer oder mehrerer der genannten Eigenschaften ist.

Auftragsstruktur

Auch die Auftragsstruktur beeinflusst die Auswahl eines geeigneten Mechanismus zur Fehlervermeidung. Neben der Beschaffenheit der Artikel einer Position ist auch

die Anzahl der Entnahmeeinheiten pro Position ein Kriterium für den wirtschaftlichen Einsatz eines Identverfahrens. Beim Vergleich der bereits heute eingesetzten Verfahren Wiegen und Barcodescannen (vgl. Abschnitt 3.3) zeigt sich, dass es beispielsweise deutlich weniger aufwendig ist, eine hohe Stückzahl eines Artikels durch Wiegen zu ermitteln als durch Scannen der einzelnen Entnahmeeinheiten.

Kommissionierprozess/Kommissionierstrategien

Die Besonderheiten des Kommissionierprozesses sind oft maßgeblich, ob ein bestimmtes Verfahren zur Fehlerüberprüfung überhaupt eingesetzt werden kann. So kann beispielsweise ein neu zu entwickelndes System, das auf einem Kommissionierwagen mitgeführt werden soll auch nur dann eingesetzt werden, wenn ein solcher vorhanden ist. Dabei lässt sich weiterhin unterscheiden, ob der Kommissionierwagen im Hauptgang vor der Gasse stehengelassen oder mit in die Gasse genommen wird. Bei der Kommissionierstrategie Multi-Order-Picking erfolgt die Ablage in mehrere Sammelbehälter. Da dies eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt, ergeben sich dadurch weitere Anforderungen an den Mechanismus der Fehlervermeidung.

Von den genannten Kriterien stellen insbesondere die wirtschaftliche Einsetzbarkeit des Systems in großen Kommissionierlägern und die Wirksamkeit der Funktion der Fehlervermeidung bei einem breiten Artikelspektrum zentrale Anforderungen an die Entwicklung von Konzepten der Fehlervermeidung dar. Anhand dieser Kriterien wurden in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des PA die drei im Folgenden spezifizierten Szenarien festgelegt, in denen ein fehlersicheres Pick-by-Vision System in unterschiedlicher Ausprägung eingesetzt werden kann:

Szenario 1

Das Szenario 1 repräsentiert ein kleines Lager mit Kleinteilen. Der Kommissionierer arbeitet auf engem Raum, beispielsweise in einem Kommissioniernest oder an einem stationären Kommissionierarbeitsplatz. Die Lagerfächer sind bedingt durch die Größe der Artikel sehr klein. Das Sortiment ist bezüglich der Bauteilgröße homogen, bezüglich der Form der Artikel allerdings sehr inhomogen. Artikel sind beispielsweise Schrauben oder Sicherungsringe. Aufgrund ihres Materials, ihrer Form, Größe und ihres Wertes sind diese nicht dafür geeignet, mittels optischer oder elektromagnetischer Verfahren identifiziert zu werden. Teilweise lassen sich die Artikel schwer vereinzeln, da sie dazu neigen, sich zu verhaken. Die Entnahmemenge pro

Position reicht von einem bis zu mehreren hundert Stück. Nach der Entnahme werden die Artikel ggf. in einem Zwischenschritt in einen Kunststoffbeutel verpackt und anschließend in einen oder mehrere Sammelbehälter abgelegt.

Szenario 2

Das Szenario 2 repräsentiert ein kleines (Schnelldreher-)Lager mit einigen hundert Lagerfächern. Es handelt sich um ein Fachboden- oder Durchlaufregallager mit mehreren Gassen. Das Sortiment ist weitgehend homogen hinsichtlich der Größe und Form der Artikel. Es wird davon ausgegangen, dass das Sortiment aus verpackten und unverpackten Artikeln mittlerer Größe besteht, und bedingt durch die Auftragsstruktur je Position meist nur eine geringe Stückzahl von bis zu zehn Stück zu entnehmen ist. Teilweise sind größere und schwerere Artikel beidhändig zu greifen. Es besteht die Möglichkeit, die Artikel ohne Probleme einzeln zu handhaben und diese auch einzeln durch ein Identifikationssystem, beispielsweise anhand eines Barcode-Etiketts, zu erfassen. Die Ablage erfolgt in einen oder mehrere Sammelbehälter, die sich auf einem Kommissionierwagen befinden. Dieser kann, muss aber nicht bis zum Entnahmefach mitgeführt werden.

Szenario 3

Das Szenario 3 beinhaltet ein großes Kommissionierlager mit bis zu 100.000 Lagerfächern, das auch aus mehreren Gassen besteht und mehrere Zonen umfassen kann. Dadurch ergeben sich deutlich längere Laufwege als bei den Szenarien 1 und 2. Die Artikelstruktur entspricht überwiegend dem Szenario 2, jedoch können einzelne sehr große Artikel oder mit Szenario 1 vergleichbare Kleinteile nicht ausgeschlossen werden. Auch die Auftragsstruktur kann als Mischform zwischen den Szenarien 1 und 2 angesehen werden. Die Ablage erfolgt in einen oder mehrere Sammelbehälter, die auf einem Kommissionierwagen mitgeführt werden. Dieser wird in der Regel auch in den Gassen mitgeführt und nicht im Hauptgang stehen gelassen.

4.2 Anforderungsdefinition

Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Systems, das die Entdeckung und ggf. Behebung von Kommissionierfehlern direkt am Entstehungsort ermöglicht. Dabei soll eine Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung erfolgen. In Zusammenarbeit mit den im PA vertretenen Unternehmen wurden hierfür zentrale Anforderungen an ein fehlersicheres Pick-by-Vision System erarbeitet und klassifiziert. Dabei wurde die unterschiedliche Sichtweise sowohl des AR-Entwicklers als auch des AR-Benutzers, in diesem Fall des Kommissionierers, berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-1 zusammengefasst.



Abbildung 4-1: Übergeordnete Anforderungen an ein fehlersicheres Pick-by-Vision System

Eine wesentliche Anforderung an Leistungsfähigkeit eines fehlersicheren Pick-by-Vision System ist eine hohe Erkennungssicherheit. Das bedeutet, es sollen möglichst alle Arten von Kommissionierfehlern zuverlässig erkannt werden. Das System ist idealerweise so auszuführen, dass auch eine Erhöhung der Kommissionierleistung gegenüber konventionellen Kommissioniersystemen erreicht wird. Auf keinen Fall sollte es jedoch den Kommissionierprozess verlangsamen, indem es beispielsweise zusätzlichen Handhabungsaufwand verursacht. Mit diesem Ziel geht auch die Anforderung einher, dass der Kommissionierer beide Hände für eigentliche Kommis-

sionieraufgabe frei haben soll. Die Unterstützung durch das System soll so erfolgen, dass der Kommissionierer dieses nicht wahrnimmt, solange ihm kein Fehler unterläuft. Im dem Fall, dass ein Fehler auftritt, müssen stets Handlungsmöglichkeiten zur Fortsetzung des Kommissionierprozesses gegeben sein. Hierzu gehören auch entsprechende Eingabemöglichkeiten, um eine Fehlermeldung durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist die Eingabe, wenn in einem Lagerfach eine unzureichende Menge oder der falsche Artikel vorhanden ist.

Aus technischer Sicht ist es erforderlich, dass die mobilen Bestandteile des Systems eine gewisse Zeit mit einer Akkuladung auskommen. Als Idealfall ist der ununterbrochene Betrieb über eine Schicht, ohne den Akku laden oder wechseln zu müssen, anzusehen. Im Falle eines Akkuwechsels ist zu berücksichtigen, dass dieser möglichst schnell und einfach vollzogen werden kann. Um dem Einsatz im industriellen Umfeld gerecht zu werden, muss das System robust gegenüber Umgebungseinflüssen sein. Hierzu gehört beispielsweise die Unempfindlichkeit gegenüber Staub, Temperatur oder unterschiedlich starkem Lichteinfall.

Aus ergonomischen Gesichtspunkten ist eine niedrige Latenzzeit und ein geringes Gewicht anzustreben, insbesondere bei den Systembestandteilen, die am Körper getragen werden. Auch die Bewegungsfreiheit darf durch die Ausrüstung am Körper nicht eingeschränkt werden. Sowohl aus Gründen der Ergonomie als auch im Hinblick auf eine hohe Kommissionierleistung und Flexibilität soll der Umgang mit dem System schnell erlernbar sein. Dies bedingt auch eine einfache und intuitive Bedienbarkeit, so dass durch das fehlersichere Pick-by-Vision System vermiedene Kommissionierfehler nicht durch neu hinzukommende Bedienungsfehler kompensiert werden. Der Beachtung ergonomischer Aspekte ist vor dem Hintergrund einer ständig älter werdenden Belegschaft in vielen Unternehmen eine besondere Bedeutung beizumessen.

Allgemein soll das System niedrige Anschaffungs- und Betriebskosten aufweisen, sowie flexibel einsetzbar sein.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass das System so zu gestalten ist, dass der Kommissionierer den Vorteil durch die Arbeit mit dem System erkennen kann. Bei unzureichender Akzeptanz der Nutzer ist damit zu rechnen, dass die erwartete Steigerung der Kommissionierqualität nicht erreicht wird, auch wenn alle anderen Anforderungen erfüllt sind.

Für die weitere Detaillierung der Anforderungen wird eine gedankliche Aufteilung des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems in die beiden nachstehenden Subsysteme vorgenommen:

- Subsystem der Werkerführung
- Subsystem der Fehlerüberprüfung

Das **Subsystem der Werkerführung** umfasst im Wesentlichen die Darstellung der Prozessinformationen im HMD und das Interaktionskonzept (hauptsächlich zur schrittweisen Auftragsbearbeitung) und somit den Funktionsumfang des Systems nach [Gün-2009]. An dieser Stelle sei auch auf die ausführliche Anforderungsliste in [Gün-2009] verwiesen. Als zusätzliche Anforderung an das Subsystem der Werkführung kommt eine entsprechende Erweiterung des Interaktionskonzeptes hinsichtlich des Fehlerhandlings für die verschiedenen Fehlerzustände hinzu.

Die Fehlerzustände, die hierbei zu berücksichtigen sind, hängen auch von der Realisierung des **Subsystems der Fehlerüberprüfung** ab. Dieses dient der Erkennung von Fehlern. Prinzipiell sollten alle Fehlerarten zuverlässig durch das Subsystem der Fehlerüberprüfung erkannt werden. Die tatsächlich erkannten Fehlerarten hängen aber stark von dem ausgewählten Konzept für die Realisierung des Prüfsystems ab.

5 Konzeptentwicklung

5.1 Vorgehen bei der Konzeptentwicklung

Ein wesentliches Ziel der Entwicklung von Konzepten für die Funktion der Fehlervermeidung ist es, der Entstehung von Fehlern präventiv, beispielsweise durch intuitive Informationsbereitstellung, entgegenzuwirken. Da dies nicht immer ausreichend ist, soll ein Mechanismus für die aktive Fehlervermeidung entwickelt werden, der es ermöglicht, Fehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Im Gegensatz zu einer Warenausgangskontrolle, die erst im Nachhinein, also reaktiv wirkt, zielt die aktive Fehlervermeidung darauf ab, Fehler während oder unmittelbar nach wichtigen Prozessschritten zu erkennen. Abbildung 5-1 zeigt den Prozess der Fehlererkennung und -behebung bei der klassischen Belegkommissionierung in Verbindung mit einer Warenausgangskontrolle und mögliche Ansatzpunkte für die aktive Fehlervermeidung mit einem Pick-by-Vision System.

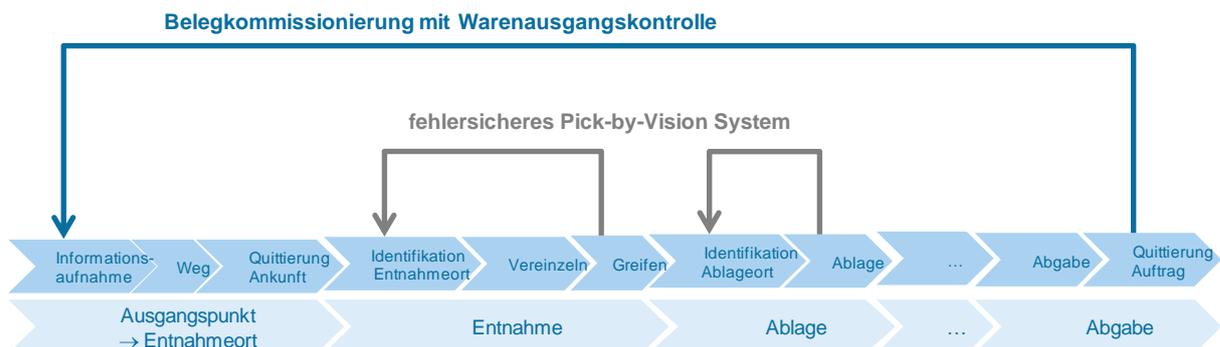


Abbildung 5-1: Vergleich von aktiven und reaktiven Maßnahmen der Fehlervermeidung

Auf Basis der in Abschnitt 4.1 erarbeiteten Einsatzszenarien wird für die gezielte Suche nach Ident- und Tracking-Technologien ein Modellprozess definiert, der Bestandteil aller drei betrachteten Szenarien ist. Im Fokus des hierzu abgegrenzten Teilprozesses stehen die Prozessschritte Entnahme und Ablage, da ein Fehler, der bei diesen Schritten entdeckt wurde, meist mit geringem Aufwand unmittelbar am Entstehungsort korrigiert werden kann. Die Beschreibung der Einsatzszenarien in Abschnitt 4.1 lässt teilweise noch mehrere Gestaltungsvarianten zu, die ebenfalls einen Einfluss auf die Auswahl bzw. Entwicklung eines geeigneten Prüfmechanismus haben. Ein Beispiel hierfür ist die Fragestellung, ob der Kommissionierer einen ggf. vorhandenen Kommissionierwagen mit in die Gasse nimmt oder diesen im Hauptgang stehen lässt. Für die weitere Suche nach technischen Lösungen für die Funk-

tion der Fehlervermeidung wird deshalb ein vereinfachtes Modell-Szenario definiert, das von den Mitgliedern des PA als repräsentativ für eine große Anzahl manueller Kommissioniersysteme angesehen wird. Aus systemtechnischer Sicht sind in dem Modell-Szenario folgende Elemente vorhanden:

- Kommissionierer
- Regal
- Bereitstellereinheit (z. B. ein Behälter im Regal)
- Artikel/Entnahmeeinheit
- Sammelbehälter
- Kommissionierwagen

Die Beziehungen zwischen den Elementen werden festgelegt wie folgt: Die Ware wird stets in einem Regal bereitgestellt. Die einzelnen Artikel/Entnahmeeinheiten können in einer Bereitstellereinheit, z. B. einem Sichtlagerkasten, gelagert werden. Der Kommissionierer führt stets einen Kommissionierwagen mit sich, den er auch in die Lagergasse mitnimmt. Die Ablage kann sowohl geordnet als auch ungeordnet in einen oder mehrere Sammelbehälter auf dem Kommissionierwagen erfolgen. Zentrale Bedeutung hat der Kommissionierer, dessen Körper, insbesondere auch Kopf und Gliedmaßen, von einem System der Fehlerüberprüfung erfasst werden können. Abbildung 5-2 verdeutlicht die abgegrenzten Prozessschritte und die Elemente des Modellszenarios in grafischer Form.

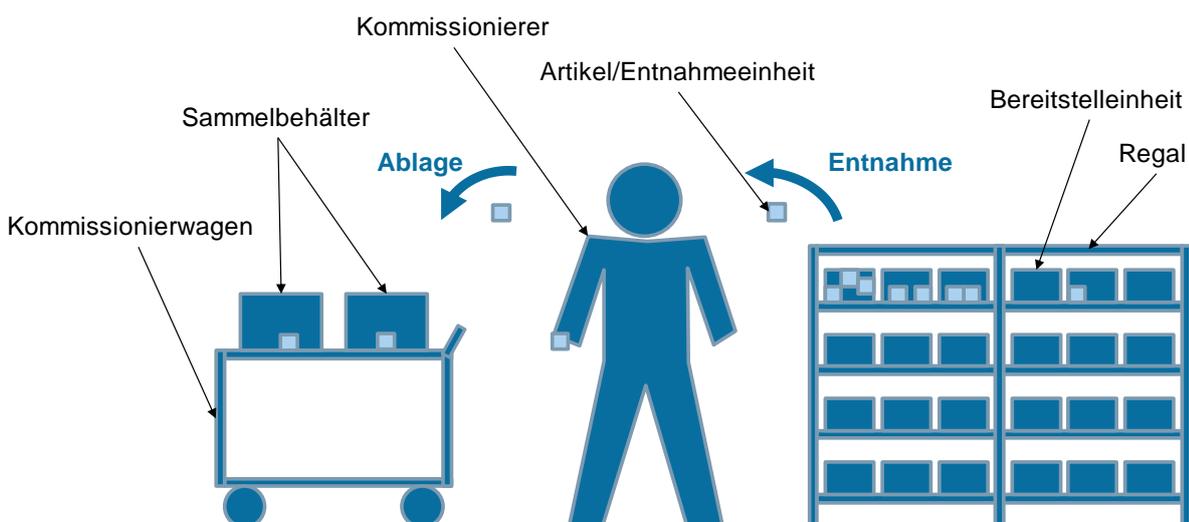


Abbildung 5-2: Modell-Szenario für die Entwicklung eines Mechanismus zur Fehlervermeidung

Für die Konzeptentwicklung wird die in Abschnitt 4.2 eingeführte gedankliche Gliederung des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems in ein Subsystem der Werkerführung und ein Subsystem der Fehlerüberprüfung angewandt. Das Subsystem der Werkerführung basiert im Wesentlichen auf den Erkenntnissen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“, in dem ein Interaktionskonzept einschließlich einer grafischen Benutzeroberfläche für die Kommissionierung mit einem Head-mounted Display entwickelt wurde. Es konnte gezeigt werden, dass die intuitive Art der Informationsbereitstellung einen Beitrag zur präventiven Fehlervermeidung leisten kann [Gün-2009]. Basierend auf den Arbeiten von Reif [Rei-2009] und Schwerdtfeger [Scw-2009] erfolgt eine Anpassung und Erweiterung des Interaktionskonzeptes für verschiedene Fehlerzustände. Für das Subsystem der Fehlerüberprüfung werden verschiedene Konzepte entwickelt.

Hierzu erfolgt in einem ersten Schritt die Betrachtung der Möglichkeiten, die existierende Pick-by-Vision Systeme hinsichtlich der Fehlervermeidung bieten, ohne dass weitere Technik zum Einsatz kommt. So erhält der Kommissionierer durch die Anzeige einer virtuellen Artikelnummer oder Artikelbezeichnung im HMD die Möglichkeit, eigenverantwortlich einen Abgleich zwischen der virtuellen Artikelnummer und einem Etikett auf der Entnahmeeinheit durchzuführen. Im Gegensatz zu einer Kommissionierliste wird nur die relevante Artikelnummer im HMD angezeigt, und der Kommissionierer kann durch geschicktes Neben- oder Übereinanderhalten die beiden Artikelnummern zeichenweise vergleichen. Bei der Belegkommissionierung müsste der Kommissionierer ständig den Blick zwischen Liste und Artikel wechseln und Zeichengruppen vergleichen, die er sich kurzfristig merkt, was den Nachteil mit sich bringt, dass mit nachlassender Konzentrationsfähigkeit Fehler (z. B. Zahlendreher) auftreten können. Analog zum Vergleich der Artikelnummern kann im HMD auch ein Bild gezeigt werden, das einen Formvergleich mit dem realen Produkt ermöglicht.

Erfolgt die Interaktion mit dem Pick-by-Vision System per Spracheingabe, können vergleichbar mit Pick-by-Voice Prüzfiffern eingegeben werden. So kann beim Abschluss einer Position die Ansage der entnommenen Stückzahl, der letzten Stellen der Artikelnummer oder einer zusätzlichen Prüzfiffer am Lagerfach verlangt werden, um mit der Auftragsbearbeitung fortzufahren. Unabhängig davon, ob die Quittierung per Spracheingabe oder durch einen Dreh-Drückknopf erfolgt, können Fehler reduziert werden, wenn die Quittierung artikelweise erfolgt, weil im Gegensatz zur posi-

tionsweisen Quittierung eine bessere Kontrolle der entnommenen Stückzahl möglich ist.

Auch wenn durch die genannten Lösungen Fehlerfreiheit nicht garantiert werden kann, wird davon ausgegangen, dass die Kommissionierqualität erhöht werden kann, während die Kosten für das Subsystem der Fehlerüberprüfung niedrig bleiben. Ein Nachteil dieser Lösungen ist, dass oftmals zusätzliche Prüf- oder Quittierschritte notwendig sind, die sich negativ auf die Kommissionierleistung auswirken. Ein weiterer Nachteil ist die Tatsache, dass der Mensch weiterhin als potenzielle Fehlerquelle erhalten bleibt. Das Ziel der Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung ist also allein durch eine eigenverantwortliche Überprüfung von Prozessschritten nicht zu erreichen.

Aus diesem Grund werden nachfolgend Lösungen betrachtet, bei denen eine Kontrolle relevanter Prozessschritte durch einen Prüfmechanismus stattfindet. Hierfür erfolgt die Entwicklung von Konzepten durch die systematische Variation denkbarer Alternativen und die Recherche von bereits am Markt erhältlichen Technologien und Komponenten für die Realisierung des Prüfmechanismus. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Ident-, Mess-, Trackingtechnologien bzw. -sensoren aus verschiedenen Bereichen der Technik.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich technische Maßnahmen zur Fehlervermeidung in zwei Gruppen einteilen lassen: Neben Lösungsansätzen, die darauf abzielen, den Kommissionierer bei der eigenverantwortlichen Fehlervermeidung zu unterstützen, stellt der Einsatz eines zusätzlichen Prüfmechanismus die Grundlage für eine Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung dar. Die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Konzepte sind ausschließlich der zweitgenannten Gruppe zuzuordnen. Es erfolgt weiterhin die getrennte Betrachtung von Konzepten ohne (vgl. Abschnitt 5.2) und mit einem Trackingsystem (vgl. Abschnitt 5.3). Vorausgewählte Konzepte sowohl mit als auch ohne Trackingsystem werden in Abschnitt 5.4 näher beschrieben. In Abschnitt 5.5 erfolgt die Bewertung der vorausgewählten Konzepte hinsichtlich deren Eignung für mögliche Einsatzszenarien und die Auswahl eines erfolgversprechenden Konzeptes für die anschließende Umsetzung als Demonstrator.

5.2 Konzepte ohne Trackingsystem

Ein vollständiges AR-System verfügt gemäß der Definition in Abschnitt 2.1.2 über ein Trackingsystem. Allerdings ist der Einsatz von Tracking nicht in jedem Kommissioniersystem sinnvoll bzw. möglich und erhöht generell die Komplexität eines Pick-by-Vision Systems. Im Rahmen des Forschungsvorhabens 14756 N zeigten auch Systeme ohne Tracking ihre Einsatzfähigkeit [Gün-2009]. Aus diesem Grund werden zunächst Methoden der Fehlervermeidung ohne den Einsatz eines Trackingsystems erarbeitet. Industrielle Mess- und Identifikationstechnologien bieten die Voraussetzungen, ohne eines zusätzlichen Prozessschrittes festzustellen, ob beispielsweise in das richtige Lagerfach gegriffen oder der richtige Artikel entnommen wurde. Auf Basis der genannten Technologien werden Konzepte entwickelt, die verschiedene Objekte während oder kurz nach dem Pickvorgang identifizieren können. Dabei wird angestrebt, die Quittierung und die Überprüfung zu einem Schritt zusammenzufassen und diesen Vorgang weitgehend zu automatisieren, um den Einfluss menschlicher Fehler im Hinblick auf die Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung zu kompensieren.

5.2.1 Technologieübersicht

Die Aufgabe automatischer Identifikationssysteme ist die einfache und schnelle Bereitstellung von Informationen zur Identifizierung von Personen, Gegenständen oder Tieren in Form von Daten [Fin-2002].

Ein Identifikationssystem besteht in der Regel aus einem Informationsträger, einem Lesegerät und einem Rechner zur Datenverarbeitung. Zur eindeutigen Kennzeichnung und Identifikation ist das Anbringen eines Informationsträgers direkt am Objekt erforderlich. Mit einem entsprechenden Lesegerät können so die hinterlegten Informationen und Daten bei Bedarf direkt am Objekt ausgelesen und zur Verarbeitung an einen Rechner weitergeleitet werden. [Han-1990]

Identifikationstechnologien lassen sich nach [Gün-2011a] anhand des physikalischen Wirkprinzips in magnetische, mechanische, optische, elektromagnetische und chemische Identifikation einteilen. Abbildung 5-3 gibt einen Überblick über gängige Identifikationstechnologien.

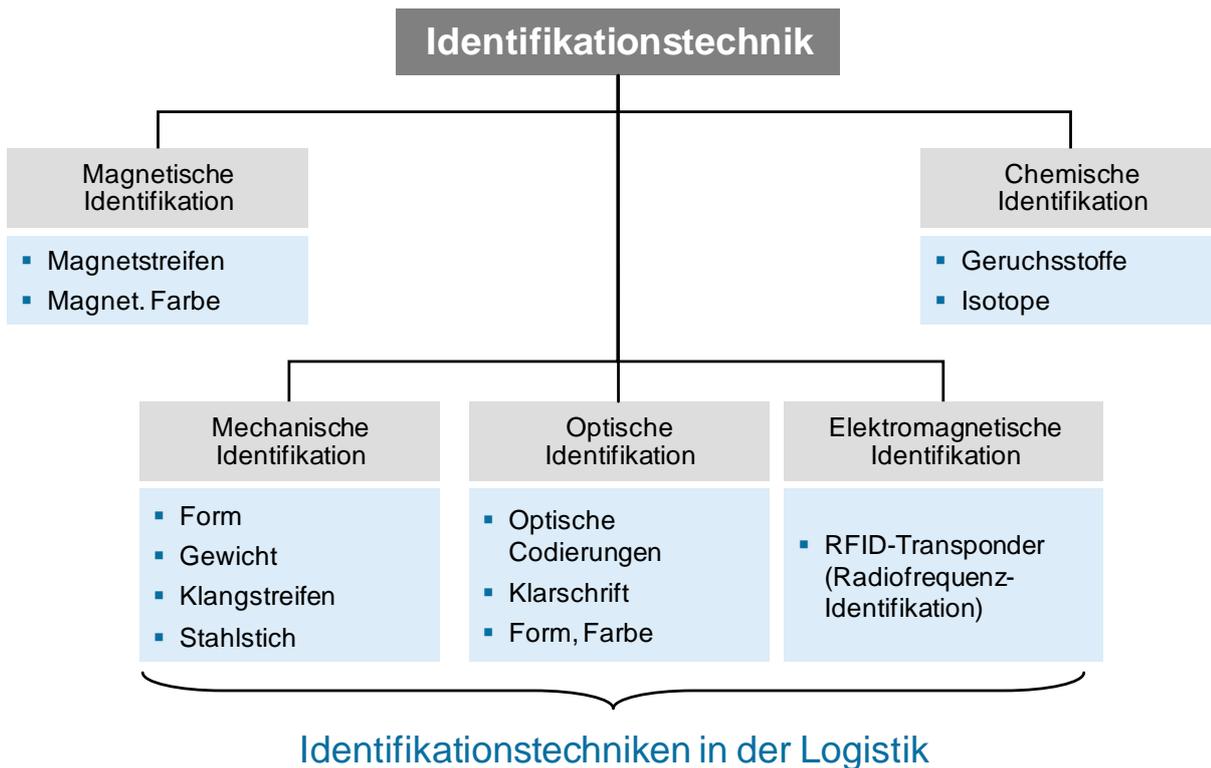


Abbildung 5-3: Physikalische Grundstruktur der Identifikationstechnik [Gün-2011a]

In der Logistik werden von den in der Abbildung 5-3 genannten Technologien die mechanische, die optische und die elektromagnetische Identifikation mittels Radio Frequency Identification (RFID) eingesetzt. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben und mögliche Konzepte für die Vermeidung von Kommissionierfehlern abgeleitet.

5.2.2 Optische Identifikation und Lasermesstechnik

Optische Identifikationssysteme besitzen mit 75 % den größten Anteil an allen heute im Einsatz befindlichen Identifikationssystemen [Dat-2012]. Die Erkennung eines Objektes durch optische Identifikation kann anhand der folgenden Kriterien erfolgen [Gün-2011a]:

- Optische Codierungen
- Klarschrift
- Form, Farbe

In Abschnitt 3.3 wird das Erfassen von optischen Codierungen mittels eines Handscanners als gängige Maßnahme zur Vermeidung von Kommissionierfehlern ge-

nannt. Als optische Codierung dient dabei überwiegend ein Barcode. Es handelt sich dabei um eine optoelektronisch lesbare Schrift, die aus unterschiedlich breiten, parallelen Strichen und Lücken besteht [Swa-2012]. Barcodes werden beispielsweise in Form von Etiketten auf Produkte aufgebracht oder sind bereits in das Verpackungsdesign integriert. In Abhängigkeit von der Branche werden genormte Barcodes, beispielsweise EAN, UPC, Code 2/5 interleaved oder Code 39, eingesetzt [Scu-2001]. Für die manuelle Erfassung von Barcodes existieren verschiedene Bauformen von optischen Lesegeräten, beispielsweise Handscanner, Lesestifte oder Ringscanner. Die Codelesung erfolgt mittels eines Laser-Scanners, einer CCD-Zeilenkamera (Charge-coupled Device-Zeilenkamera) oder eines Fototransistors [Arn-2009]. Ein wesentlicher Nachteil dieser Geräte ist, dass sie nur eine Bildzeile erfassen können.

Auf CCD-Matrixkameran basierende Systeme mit einer Bildverarbeitungssoftware ermöglichen hingegen auch, ein Flächenbild und somit 2D-Codes, wie z. B. Data Matrix, zu erfassen [Jod-2005.] Diese weisen eine deutlich höhere Informationsdichte als eindimensionale Barcodes auf [Jod-2005]. Neben der Erkennung von 2D-Codes erlauben kamerabasierte Systeme auch die Erkennung von Hand- und Klarschriften und die Identifikation von Objekten anhand der Form und/oder der Farbe. Derartige Identifikationssysteme sind derzeit nur in einzelnen industriellen Anwendungen meist in hochautomatisierten Produktionsanlagen zu finden. Da in den betrachteten Einsatzszenarien für ein fehlersicheres Pick-by-Vision System (vgl. Abschnitt 4.1) die Voraussetzungen insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Beleuchtungsbedingungen und eines ausreichend gut unterscheidbaren Artikelspektrums in der Regel nicht gegeben sind, wird die Identifikation von Objekten anhand der Form oder der Farbe im Rahmen des Forschungsprojektes nicht weiter berücksichtigt.

Eine weitere Variante der Objekterkennung, die im vorliegenden Bericht aufgrund der Ähnlichkeit zum Barcode-Scannen ebenfalls der optischen Identifikationstechnik zugeordnet wird, ist der Einsatz von Laserscannern. 3D-Laserscanner erzeugen durch das zeilen- oder rasterartige Überstreichen von Oberflächen beziehungsweise Körpern durch einen rotierenden Laserstrahl eine 3D-Punktwolke [Gün-2011b]. Somit können Laserscanner zur Überwachung einer bestimmten Ebene (2D-Laserscanner) oder eines bestimmten Raums (3D-Laserscanner) verwendet werden. Sie werden beispielsweise als Sicherheitseinrichtung in Produktionsanlagen [Sic-

2012] oder zur Erzeugung von 3D-Geländemodellen in der Baustellenplanung [Gün-2011b] eingesetzt.

Neben einem Laserscanner, bei dem die Abtastung durch einen rotierenden Laserstrahl erfolgt, können auch fest installierte Lichtschranken bzw. Lichttaster so angeordnet werden, dass die Form eines Objektes (z. B. zur Höhenmessung) erfasst werden kann. Lichtschranken werden auch als Sicherheitselement in Produktionsmaschinen eingesetzt, um Körperbewegungen des Bedieners zu detektieren.

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Ein mögliches Konzept für den Mechanismus der Fehlervermeidung ist die Überprüfung von Entnahmeeinheiten mittels eines Barcode-Handscanners, der mit dem Pick-by-Vision System gekoppelt wird. Diese Methode wird bereits heute beispielsweise in Verbindung mit MDTs eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.2.4 und Abschnitt 3.3). Jedoch ist hierbei negativ zu sehen, dass zusätzliche Handhabungsschritte zur Überprüfung notwendig sind, und somit ein zusätzlicher Zeitbedarf anfällt.

Deshalb werden weitere Konzepte auf Basis optischer Identverfahren entwickelt, bei denen zusätzliche Handhabungsschritte entfallen. Durch den Verzicht auf ein handgeführtes Gerät und die Automatisierung der Identifikation sind verschiedene Alternativen denkbar, bei denen dem Kommissionierer beide Hände für die eigentliche Arbeitsaufgabe zur Verfügung stehen. Trägt der Kommissionierer beispielsweise ein in Blickrichtung ausgerichtetes kamerabasiertes Identsystem auf dem Kopf, können Entnahmeeinheiten einfach überprüft werden, indem diese in das Blickfeld des Kommissionierers und somit den Erfassungsbereich der Kamera gehalten werden. Dieses Konzept wird unter der Bezeichnung Konzept 7: „Kopfbasierte Kamera“ in Abschnitt 5.4.7 ausführlich beschrieben.

Durch eine Kamera am Kommissionierwagen können bereits gesammelte Artikel überprüft werden, wenn diese so abgelegt werden, dass deren optische Codierungen von der Kamera erfasst werden. Als Alternative bzw. Ergänzung ist es denkbar, einen Laserscanner einzusetzen, der die Oberfläche der auf dem Wagen befindlichen Artikel erfasst und durch die Identifikation anhand der Form zu einer Verbesserung der Erkennungswahrscheinlichkeit beiträgt. Der Einsatz eines optischen Identifikationssystems am Kommissionierwagen wird als Konzept 4: „Kommissionierwagen mit Identsystem“ in Abschnitt 5.4.4 detailliert beschrieben.

Wird auf die Identifikation jeder einzelnen Entnahmeeinheit verzichtet, und stattdessen überprüft, ob die Entnahme aus dem richtigen Lagerfach erfolgt ist, kann ein Laserscanner oder ein Lichtvorhang verwendet werden, um die Regalfront zu überwachen. Dieses Prinzip lässt sich auch auf die Überprüfung des Prozessschrittes Ablage beim Multi-Order-Picking übertragen. Lichtschranken über den Sammelbehältern ermöglichen die Überprüfung, ob die Ablage in den richtigen Behälter erfolgt ist. Der Einsatz von Laserscannern und Lichtgittern zur Überprüfung der Entnahme und Ablage werden in Abschnitt 5.4.1 unter der Bezeichnung Konzept 1: „Lichtvorhang vor Regal“ ausführlicher beschrieben.

5.2.3 Mechanische Identifikation anhand des Gewichtes

In der Logistik wird von den in Abbildung 5-3 gezeigten Verfahren der mechanischen Identifikation lediglich die Identifikation anhand des Gewichtes in größerem Umfang zur automatischen Identifikation angewandt.

Bei üblichen industriellen Waagen erfolgt die Massenbestimmung durch Messung der Gewichtskraft. Während mechanische Geräte in industriellen Anwendungen weitgehend verdrängt wurden, haben heute elektromechanische und elektronische Waagen die größte Bedeutung. Diese ermitteln die Masse unter Verwendung physikalischer Größen wie Strom oder Spannung. Bei elektromechanischen Waagen erfolgt die Messung mittels Dehnungsmessstreifen, Schwingsaitenaufnehmer oder Differentialtransformator unter Zuhilfenahme mechanischer Zwischengrößen, während elektronische Waagen das Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation nutzen. [Dre-2007]

Neben dem Messprinzip lassen sich Waagen auch anhand ihrer Bauform klassifizieren. Standardwaagen können zunächst in stationäre und mobile, beispielsweise fahrbare, Waagen eingeteilt werden. Für spezifische Anwendungsfälle haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Bauformen entwickelt. Bekannte Beispiele sind Labor-, Plattform, Kran- oder Straßenfahrzeugwaagen [Dre-2007]. Ferner lassen sich anhand der Genauigkeit Analyse-, Fein-, Handels- und Grobwaagen unterscheiden [Glä-2008].

Bereits heute wird in der Kleinteilekommissionierung vielfach die Stückzahl durch Zählwiegen ermittelt (vgl. Abschnitt 3.3). Anhand des Leergewichts der Verpackung (Tara) und des Artikelgewichts (Referenzgewicht) kann die vorhandene Stückzahl von der Waage errechnet werden. Nachteilig ist hierbei, dass Tara- und Referenz-

gewichte vor jeder Stückzahlermittlung in einem zusätzlichen Schritt bestimmt werden müssen, und die Stückzahlwaage ohne Schnittstellen zu einem übergeordneten System als eigenständige Insellösung arbeitet [ide-2012].

Eine Vereinfachung des Vorgangs ergibt sich, wenn die Waage entsprechende Schnittstellen zu einem Host-System aufweist, die es erlaubt die Artikelgewichte aus einer Datenbank zu beziehen und das Ergebnis einer Stückzahlermittlung an das Host-System zurückzugeben [ide-2012].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Basierend auf einer Waage mit entsprechenden Schnittstellen sind mehrere Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung in Verbindung mit Pick-by-Vision denkbar. Durch das Mitführen einer Waage auf dem Kommissionierwagen ist diese für den Kommissionierer stets in Greifweite. Hierbei sind zwei Varianten vorstellbar. Bei der ersten Variante wird nach dem Vorbild existierender Stückzahlwaagen zunächst die Stückzahl abgewogen, ggf. separat verpackt und abschließend in einen Sammelbehälter abgelegt. Bei der zweiten Variante wird jeder Sammelbehälter auf eine eigene Waage auf dem Kommissionierwagen gestellt, um den zusätzlichen Handhabungsschritt für die Stückzahlermittlung einzusparen und im Fall des Multi-Order-Pickings die Ablage in den richtigen Sammelbehälter überprüfen zu können. Der Einsatz der Wägetechnik ermöglicht bei beiden Varianten sowohl das Ermitteln der Stückzahl als auch die Identifikation eines Artikels anhand des Gewichts und erlaubt somit in Abhängigkeit von der Artikelstruktur zumindest eine Plausibilitätsprüfung zur Vermeidung von Typfehlern. Das Prinzip, eine Waage mobil auf dem Kommissionierwagen einzusetzen, wird im Konzept 2: „Waage auf Kommissionierwagen“ in Abschnitt 5.4.2 aufgegriffen.

Ein weiterer Ansatz zur Fehlervermeidung besteht in der Kontrolle des Gewichts der Bereitstellereinheit, beispielsweise eines Behälters in einem Fachbodenregal. Jeder Behälter im Regal steht hierfür auf einer eigenen Wägezelle [Kuh-2012]. Dies ermöglicht beispielsweise die Ermittlung der entnommenen Stückzahl, indem die Gewichts Differenz vor und nach der Entnahme berechnet wird.

5.2.4 Elektromagnetische Identifikation mittels RFID

RFID ist eine Technik, die es ermöglicht, Daten über eine Luftschnittstelle mittels magnetischer (Wechsel-)Felder oder elektromagnetischer Wellen („Radio Wellen“)

lesen und schreiben zu können [Fis-2007]. Die RFID-Technologie ermöglicht die eindeutige, schnelle, berührungslose und gleichzeitige Identifikation von Objekten und Personen ohne die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung [Hah-2009].

RFID-Systeme bestehen aus den folgenden Komponenten (vgl. z. B. [Fin-2008]).

- Transponder
- Schreib-/Leseinheit, bestehend aus einem Schreib-/Lesegerät (Reader) und einer Kopplungseinheit (Antenne)
- Steuerung (Rechner/Applikation)

Die für die Identifikationsaufgabe relevanten Daten werden auf dem **Transponder** gespeichert und können mit Hilfe einer Schreib-/Leseinheit erfasst werden. Die Schreib-/Leseinheit besteht aus dem eigentlichen **Schreib-/Lesegerät** (Reader) sowie mindestens einer **Antenne**. Nach erfolgreicher Identifikation der auf dem Transponder gespeicherten Daten werden diese von einer Applikation auf dem **Steuerungsrechner** interpretiert und die gewünschten Informationen verarbeitet. Ein entscheidendes Kriterium für die Funktionsfähigkeit des RFID-Systems stellt die Funkstrecke zwischen dem Transponder und der Antenne der Schreib-/Leseinheit dar. Einfluss auf die Funkstrecke haben dabei nicht nur die Materialien zwischen den beiden Komponenten sondern auch die räumliche Umgebung des RFID-Systems.

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen ist die Auswahl der Frequenz ein wichtiges Merkmal für die Funktionalität eines RFID-Systems. Der Frequenzbereich eines RFID-Systems beeinflusst wesentliche Parameter, z. B. die Lesereichweite, die Durchdringung von Flüssigkeiten oder die Fähigkeit, mehrere Transponder im Lesebereich gleichzeitig zu erfassen (Pulzfähigkeit). Wichtige Eigenschaften der relevanten Frequenzbereiche Low-Frequency (LF), High-Frequency (HF), Ultra-High-Frequency (UHF) und Super-High-Frequency (SHF) sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst (vgl. z. B. [Fin-2008], [Ker-2007]).

Für RFID-Systeme der Logistik werden meist die Frequenzbereiche HF und UHF genutzt, wobei UHF-Systeme, die von 81 % der Anwender eingesetzt werden, am weitesten verbreitet sind [Str-2009].

Tabelle 5-1: Eigenschaften der Frequenzbereiche von RFID-Systemen [Gün-2011c]

| | 125 kHz (LF) | 13,56 MHz (HF) | 868 MHz (passiv/aktiv) (UHF) | 2,45 GHz (passiv/aktiv) (SHF) |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Kopplung | Induktiv (Nahfeld) | Induktiv (Nahfeld) | Elektromagnetisch (Fernfeld) | Elektromagnetisch (Fernfeld) |
| Einfluss von Flüssigkeiten | Niedrig | Niedrig | Mittel/Hoch | Sehr Hoch |
| Praktische max. Reichweite [m] | 0,2 | 1,5 | 10/100 | 3/300 |
| Datenübertragungsraten | Niedrig | Hoch | Sehr Hoch | Sehr Hoch |
| Pulkfähigkeit | Nein | Ja | Ja/Ja | Derzeit Nein/Ja |
| Standardisierung | Hoch | Hoch | Mittel → Hoch | Niedrig |

Der Transponder ist der eigentliche Datenträger des RFID-Systems. Üblicherweise besteht dieser aus einer integrierten Schaltung und einem Koppellement, der Antenne. Transponder unterscheiden sich neben dem Frequenzbereich unter anderem hinsichtlich der Energieversorgung, der Speicherkapazität und der Bauform.

Die Energieversorgung der Mikrochips auf dem Transponder ist eines der Hauptmerkmale zu deren Klassifizierung. Unterschieden wird dabei zwischen aktiven und passiven Transpondern. Passive Transponder verfügen über keine eigene Stromversorgung. Sie beziehen die gesamte Energie, die für ihren Betrieb notwendig ist, aus dem Feld des Lesegeräts. Sie sind klein und damit flexibel in ihren Einsatzmöglichkeiten und weisen eine hohe Lebensdauer auf. Allerdings ist die Speicherkapazität und die Lesereichweite passiver Transponder begrenzt. Beide Größen können durch die Verwendung eines aktiven Transponders mit eigener Energieversorgung erhöht werden. Nachteilig sind neben den deutlich höheren Kosten auch die begrenzte Lebensdauer und die größere Bauform. [Fin-2008]

Transponder sind mit einer Speicherkapazität von wenigen Bytes bis zu einigen Kilobytes erhältlich. Für Massenanwendungen in der Produktion und der Logistik werden in der Regel kostengünstige, passive Transponder verwendet, die eine Codierung in Form einer Identifikationsnummer, beispielsweise dem elektronischen Produktcode (EPC) enthalten. Weitere Informationen werden in einer zentralen Daten-

bank gehalten und können über ein lokales oder globales Netzwerk abgerufen werden. [Tam-2010, Fin-2008]

Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal ist die Transponderbauform. Transponder unterscheiden sich hinsichtlich der integrierten Schaltung, der Antenne und der Verkapselung. Nach [Ker-2007] werden die Bauformen Etikett, Glaskapsel, Kunststoffkapsel und Karte sowie Sonderformen unterschieden.

Für die Realisierung der Funktion der Fehlervermeidung werden im Rahmen des Forschungsprojektes insbesondere passive HF- und UHF-Transponder in Form von Etiketten betrachtet, weil diese klein, preiswert und einfach zu applizieren sind und ohne eigene Energieversorgung auskommen. Außerdem sind diese Frequenzbereiche weit verbreitet, was eine durchgängige Verwendung entlang von Lieferketten ermöglicht.

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Zur Vermeidung von Kommissionierfehlern kann analog zu dem in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen optischen System auch ein RFID-System mobil an einem Kommissionierwagen betrieben werden. Ein am Kommissionierwagen befestigtes Lesegerät erfasst dabei alle bereits gesammelten Artikel, die hierfür jeweils mit einem Transponder ausgestattet sind. Vorteilhaft gegenüber der optischen Identifikation ist, dass kein direkter Sichtkontakt zwischen dem Informationsträger und dem Lesegerät bestehen muss. Aufgrund des vergleichbaren Wirkprinzips, d. h. der Erfassung der auf dem Kommissionierwagen abgelegten Artikel, wird die RFID-Variante gemeinsam mit der optischen Variante als Konzept 4: „Kommissionierwagen mit Identsystem“ in Abschnitt 5.4.4 näher beschrieben.

Weiterhin kann ein mobiles RFID-Lesegerät in Form eines Handschuhs zur Erkennung von Kommissionierfehlern eingesetzt werden [Gün-2009]. In Abhängigkeit davon, ob Transponder an den Bereitstelleneinheiten, den Entnahmeeinheiten und/oder den Sammelbehältern vorhanden sind, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, Fehler während der Entnahme bzw. der Ablage festzustellen. Die verschiedenen Varianten sind Gegenstand der Entwicklung des Konzeptes 3: „RFID-Handschuh“ in Abschnitt 5.4.3.

Eine besondere Anwendung der RFID-Technologie stellt die Positionsbestimmung von Objekten dar. Da RFID hierbei nicht mehr ausschließlich zur Identifikation einge-

setzt wird, erfolgt für diesen Fall eine gesonderte Betrachtung als funkbasiertes Trackingverfahren in Abschnitt 5.3.6.

5.3 Konzepte mit Trackingsystem

In der Literatur wird die Aufgabe eines Trackingsystems in einem AR-System definiert als die Bestimmung der Position und der Ausrichtung eines Objektes bzw. der Position und Blickrichtung des Nutzers (vgl. z. B. [Sen-2009], [Mnr-2011]). Allerdings ermöglicht diese Definition keine eindeutige Abgrenzung zu den in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten Mess- und Identverfahren. So ist es beispielsweise möglich, die RFID-Technologie sowohl als Identtechnologie als auch als funkbasiertes Trackingverfahren einzuordnen. Deshalb wird im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende Definition für ein Trackingsystem eingeführt:

Ein Trackingsystem ermöglicht die fortlaufende Erfassung der Position oder Pose des Kommissionierers, d. h. dessen Rumpf, Kopf und/oder Gliedmaßen, und/oder der folgenden Objekte des in Abschnitt 5.1 definierten Modellprozesses:

- *Regal oder andere raumfeste Objekte*
- *Bereitstelleinheit*
- *Artikel/Entnahmeeinheit*
- *Sammelbehälter*
- *Kommissionierwagen*

relativ zueinander oder bezogen auf das globale Koordinatensystem des Lagers zur ortsbezogenen oder perspektivisch richtigen Visualisierung und/oder für die Funktion der Fehlervermeidung.

Im Folgenden werden relevante Trackingtechnologien und darauf basierende Konzepte für ein fehlersicheres Pick-by-Vision System vorgestellt.

5.3.1 Technologieübersicht

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Einteilung von Trackingsystemen. Allgemein lassen sich diese anhand des physikalischen Grundprinzips folgendermaßen klassifizieren (vgl. z. B. [Gün-2009], [Tüm-2009], [Höh-2008]):

- Mechanisches Tracking
- Inertiales Tracking
- Akustisches Tracking
- Elektromagnetisches Tracking
- Funksysteme
- Optisches Tracking

Ausgehend von der Annahme, dass Trackingsysteme jeweils aus einem Sensor, beispielsweise einer Kamera, und einer Quelle, beispielsweise einem reflektierenden Marker, bestehen, ist auch eine Einteilung anhand der räumlichen Anordnung von Sensor und Quelle möglich. Dabei werden die drei folgenden Kombinationen unterschieden (vgl. z. B. [Mec-2000], [Tüm-2009], [Höh-2008]):

- **Inside-out:** Die Sensoren sind am zu trackenden Objekt bzw. am Nutzer befestigt und erfassen in der Umgebung angebrachte Quellen.
- **Outside-in:** Umkehrung des Prinzips Inside-Out, bei dem sich die Quellen am zu trackenden Objekt bzw. am Nutzer befinden und von Sensoren außerhalb erfasst werden.
- **Inside-in:** Sowohl Sensoren als auch Quellen sind am zu trackenden Objekt bzw. am Nutzer angebracht. Inside-in Systeme bestehen meist aus mechanischen Komponenten und werden häufig zum Tracken von kleineren Körperteilen, beispielsweise der Hand oder der Finger, verwendet.

Ziel der Entwicklung von Konzepten mit Tracking ist es, die genannten Trackingverfahren sowohl für die ortsbezogene oder perspektivisch richtige Visualisierung als auch für die Funktion der Fehlervermeidung einzusetzen. Für die Visualisierung sind die Position und ggf. die Blickrichtung des Kommissionierers mit hinreichender Genauigkeit in Bezug auf das globale Koordinatensystem des Lagers vom Trackingsystem zu ermitteln. Während bei der ortsbezogenen Visualisierung eine grobe Erfassung des Körpers ausreicht, ist für die perspektivisch richtige Visualisierung eine

sehr genaue Erfassung des Kopfes notwendig. Eine ausführliche Untersuchung verschiedener Trackingtechnologien für die ortsbezogene und die perspektivisch richtige Visualisierung in einem Pick-by-Vision System findet sich in [Gün-2009, S. 162-189]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden auch in die folgenden Betrachtungen miteinbezogen. Für die Funktion der Fehlervermeidung ist es beispielsweise denkbar, den Unterarm oder die Hand mit einem Trackingsystem zu erfassen, um zu überprüfen, ob der Kommissionierer in das richtige Lagerfach gegriffen hat. Unter anderem aus Gründen der Komplexität und der Kosten wäre ein Konzept zu bevorzugen, bei dem ein einziges Trackingsystem sowohl für die Realisierung der ortsbezogenen oder perspektivisch richtigen Informationsbereitstellung als auch des Prüfsystems ausreicht.

5.3.2 Mechanisches Tracking

Beim mechanischen Tracking existiert eine physische Verbindung zwischen Messinstrument und zu trackendem Objekt. [Gün-2009] führt als Beispiel für ein mechanisches Trackingsystem eine Messapparatur ähnlich einem Roboterarm an, an dessen Gelenken und Auslegern Sensoren angebracht sind. Diese Art des Trackings wird unter anderem in VR-Systemen in der Form von schwenkbaren HMDs [Str-2011], als haptische Schnittstelle bei der Modellierung von 3D-CAD Modellen [Sen-2006] und in Robotertermesssystemen [KUK-2011] angewandt. Zu den mechanischen Trackingsystemen zählt auch das pedometrische Tracking, beispielsweise das Zählen von Schritten oder Umdrehungen von Rädern [Gün-2009].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Hinsichtlich des Einsatzes in einem Pick-by-Vision System sind die Anwendungsmöglichkeiten der genannten mechanischen Trackingsysteme sowohl für die Visualisierung als auch für die Funktion der Fehlervermeidung beschränkt. Denkbar wäre beispielsweise die Anbringung von Drehzahlsensoren an den Rädern des Kommissionierwagens, um dessen Position zu ermitteln.

5.3.3 Inertiales Tracking

Inertiales Tracking beruht auf dem Grundprinzip der Massenträgheit. Inertialsensoren werden sowohl zur Messung translatorischer als auch rotatorischer Beschleunigungskräfte eingesetzt, um auf die Bewegung eines Objektes zu schließen. Über die

zweifache Integration der Messergebnisse von drei senkrecht zueinander ausgerichteten Beschleunigungssensoren kann die Position im Raum bestimmt werden. Die relative Änderung der Orientierung lässt sich durch die Integration der Messwerte von drei orthogonal zueinander ausgerichteten Winkelgeschwindigkeitssensoren ermitteln. Da die Sensoren jeweils nur die relative Bewegung bestimmen können, ist eine Initialisierung des Systems notwendig. [Gün-2009]

Inertiales Tracking kommt zur Unterstützung von referenzbasierten Navigationssystemen [IIS-2011], zur Stabilisation von Fahrzeugen [iMa-2011] oder in Steuerungssystemen von Flugzeugen [Kai-2004] zum Einsatz. Auch in Smartphones oder Controllern von Spielekonsolen sind Inertialsensoren integriert [Man-2011]. Diese ermöglichen es beispielsweise, anhand der Lage eines Smartphones die Bildschirmansicht in die richtige Position zu drehen [Hit-2007].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Inertialsensoren sind aufgrund der notwendigen Initialisierung nicht als alleiniges Trackingsystem für den Einsatz in einem Pick-by-Vision System geeignet, können aber andere Technologien wie das optische Tracking ergänzen und diese kurzzeitig ersetzen, wenn beispielsweise aufgrund von Verdeckungen keine Daten des optischen Systems verfügbar sind. Dieser Ansatz des hybriden Trackings wird in Abschnitt 5.3.8 genauer beschrieben. Denkbar ist sowohl die Anbringung von Inertialsensoren am Kopf zur Unterstützung der perspektivisch richtigen Informationsbereitstellung als auch am Arm für die Überwachung von Greifbewegungen.

5.3.4 Akustisches Tracking

Akustisches Tracking basiert auf Laufzeitmessungen von Ultraschallwellen. Hierbei senden Ultraschall-Transponder an den zu trackenden Objekten hochfrequente Töne oberhalb von 20 kHz aus, die für das menschliche Gehör nicht mehr wahrnehmbar sind. Dieses Signal wird von im Raum verteilten Sensoren empfangen. Mittels der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit kann durch Triangulation die Position des Objekts berechnet werden. [Gün-2009]

Dieses Verfahren wird beispielsweise in Interaktionsgeräten für VR-Systeme und in 3D-Computer-mäusen für CAD-Systeme (Computer-aided Design Systeme) verwendet [INI-2011]. Weiterhin existiert ein System zur Überwachung von Montagevor-

gängen, das mittels sog. Marker an Werkzeugen oder an den Händen deren Bewegungen erfasst [ThK-2011].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Analog zur Überwachung von Montagevorgängen kann Ultraschall-basiertes Tracking in der Kommissionierung auch zur Überprüfung der Handbewegung beim Greifen und Ablegen eingesetzt werden.

5.3.5 Elektromagnetisches Tracking

Das elektromagnetische Tracking ist eine Sonderform des magnetischen Trackings, bei dem beispielsweise durch die Messung des Erdmagnetfelds die Ausrichtung eines Objektes bestimmt werden kann. Aufgrund der elektromagnetischen Störanfälligkeit und der Inhomogenität des Erdmagnetfeldes wird beim elektromagnetischen Tracking auf einen fest im Raum installierten Transmitter (Sender) zurückgegriffen, der aus drei senkrecht zueinander angeordneten Spulen besteht. Die Spulen werden alternierend mit Strom durchsetzt und erzeugen dadurch elektromagnetische Wellen. Am zu trackenden Objekt ist ein Receiver (Empfänger) angebracht, der ebenfalls aus drei orthogonal zueinander angeordneten Spulen besteht. Durch die Messung der in den einzelnen Receiverspulen induzierten Ströme kann die Ausrichtung und die Entfernung des Receivers zum Transmitter berechnet werden. [Gün-2009]

Elektromagnetisches Tracking wird beispielsweise in Motion Capturing Systemen zum Tracken und Aufzeichnen von Körperbewegungen eingesetzt [Asc-2004].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Durch die Anbringung eines Receivers am Kopf des Kommissionierers kann magnetisches Tracking für die ortsbezogene oder perspektivisch richtige Informationsbereitstellung eines Pick-by-Vision Systems verwendet werden. Ein entsprechender Receiver am Handgelenk ermöglicht darüber hinaus auch die Überwachung der Bewegung beim Greifen und Ablegen im Hinblick auf die Vermeidung von Kommissionierfehlern.

5.3.6 Funkbasiertes Tracking

Funkbasierte Trackingsysteme bestehen zum einen aus dem zu trackenden Objekt und zum anderen aus Stationen, die hochfrequente elektromagnetische Signale aussenden oder empfangen. Auf Basis von Laufzeitmessungen oder der Messung der Signalstärke kann die Position eines Objektes durch Winkelmessung (Triangulation) oder Abstandsmessung (Trilateration) bestimmt werden. [Gün-2009]

Ein bekannter Anwendungsfall von Funksystemen ist die satellitengestützte Navigation mittels GPS (Global Positioning System) zur Ortung beweglicher Objekte auf der gesamten Erde. Ähnliche Trackingsysteme, beispielsweise auf der Basis von GSM (Global System for Mobile Communications), existieren für die Handyortung, die auch in geschlossenen Räumen funktioniert [Ine-2004]. Ferner werden Funksysteme auch zur Ortung von Kindern in Freizeitparks über WLAN- oder Bluetooth-fähige Armbänder verwendet [kid-2011]. In der Industrie werden Funksysteme in erster Linie nicht zur Navigation sondern für die drahtlose Kommunikation zwischen dem WMS-Server und MDTs oder PbV-Systemen verwendet [Gün-2009]. Als Trackingsysteme werden in der Logistik beispielsweise WLAN-basierte Systeme zur Ortung von Waren eingesetzt [Mag-2011].

Auch die RFID-Technologie, die bereits in Abschnitt 5.2.4 als Identifikationsverfahren vorgestellt wurde, bietet die Voraussetzungen für funkbasiertes Tracking, indem Schreib-/Leseeinheiten und Transponder als Quellen bzw. Sensoren eines Trackingsystems fungieren. Angewandt wird die RFID-Technologie in diesem Zusammenhang unter anderem zur Materialflussüberwachung, zur Sendungsverfolgung [RFI-2011] und zur Ortung von Waren oder Flurförderzeugen in Lägern [Muc-2008].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Für den Einsatz in einem fehlersicheren Pick-by-Vision System ist der Einsatz einer RFID-Schreib-/Leseinheit am Kommissionierwagen denkbar, der im Boden integrierte oder am Regal befestigte Transponder erfasst, um die Position des Wagens zu ermitteln.

Analog zu dem in Abschnitt 5.2.4 genannten RFID-Handschuh könnte in einem mit RFID-Transpondern ausgestatteten Lager auch ein mobiles Lesegerät am Bein getragen bzw. in einen Schuh integriert werden, um die Position des Kommissionierers zu ermitteln. Die Positionsdaten können sowohl für eine ortsbezogene Visualisierung als auch für die grobe Überprüfung verwendet werden, ob sich der Kommissionierer

vor dem bzw. in der Nähe des richtigen Entnahmefachs befindet. Neben den beiden inside-out Konzepten ist auch die Umkehrung denkbar, bei der ein Transponder am Kommissionierer bzw. am Kommissionierwagen von ortsfest im Lager installierten Schreib-/Leseeinheiten erfasst wird.

5.3.7 Optisches Tracking

Optisches Tracking lässt sich weiter in passive und aktive Systeme unterteilen. Bei aktiven Systemen senden die zur Positionserfassung relevanten Objekte selbst Licht aus. Beim passiven Verfahren wird die Position und ggf. die Ausrichtung der Objekte allein aufgrund ihrer Form und Farbe oder durch Reflexionen erkannt. Häufig werden Infrarot- (IR) oder Videokameras eingesetzt. [Gün-2009]

IR-Tracking

IR-Kameras strahlen IR-Licht aus und erfassen das von passiven Markierungen an den Objekten (Targets) reflektierte IR-Licht. Alternativ wird das von aktiven Targets ausgesendete IR-Licht erfasst. Mittels eines Rechners lässt sich aus den auf diese Weise ermittelten Daten die Position der Targets bestimmen. [Gün-2009]

IR-Tracking kommt in vielen VR- und AR-Anwendungen zum Einsatz, um die genaue Position und Ausrichtung von Personen oder Objekten zu erfassen. Weitere Anwendungsbeispiele sind die Medizintechnik sowie die Vermessung von Maschinen in der Industrie [adv-2011].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Pick-by-Vision“ wurde ein IR-Trackingsystem nach dem Prinzip outside-in verwendet, bei dem mehrere IR-Kameras pro Lagergasse ein Target aus reflektierenden kugelförmigen Markern am HMD zur Ermittlung der Position und der Blickrichtung des Kommissionierers erfassen [Gün-2009]. Basierend auf diesem System kann auch die Hand oder der Unterarm mit einem Target versehen werden, um zu überprüfen, ob der Kommissionierer in das richtige Fach greift. Ist die Position und die Ausrichtung des mitgeführten Kommissionierwagens beispielsweise durch Anbringung eines zusätzlichen Markers bekannt, so kann beim Multi-Order-Picking auch die Ablage in den richtigen Sammelbehälter überprüft werden. Der Ansatz, die Hand bzw. den Unterarm des Kommissionierers durch ein outside-in IR-Trackingsystem zu erfassen, wird in Abschnitt 5.4.5 unter der Bezeich-

nung Konzept 5: „IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms“ detailliert betrachtet. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Anordnung von IR-Kameras und Targets zu variieren. So ist es beispielsweise vorstellbar, mehrere IR-Kameras am Kommissionierwagen zu montieren und diese mobil einzusetzen. Um die räumlichen Beziehungen zwischen Lager, Kommissionierer und Kommissionierwagen zu ermitteln, sind das Lager und der Kommissionierer mit Targets auszustatten. Eine ausführliche Betrachtung des Konzeptes 6: „Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen“ ist Gegenstand von Abschnitt 5.4.6.

Videobasiertes Tracking

Beim Tracking mit einer Videokamera erfolgt die Ermittlung der Position und Ausrichtung eines Objektes durch eine Bildverarbeitungssoftware. Das videobasierte Tracking lässt sich weiter in markerbasiertes und markerloses Tracking einteilen.

Beim **markerbasierten Tracking** werden meist im Raum verteilte zweidimensionale Markierungen (Marker) verwendet, die sowohl zur Orientierung als auch als Markierungen für das Einblenden virtueller Informationen dienen [Reg-2007]. Neben Markern in Papierform [Reg-2007] werden auch Marker aus Filzstoff eingesetzt, um zu Fehlern führende Reflexionen zu vermeiden [Div-2010]. Als Kameras können bereits einfache Webcams ausreichen. Je nach Anwendungsfall ist auf eine ausreichend hohe Auflösung zu achten. Für AR-Anwendungen werden sowohl Open-Source Softwarepakete wie ARToolKit oder ARTag [Div-2010] als auch kommerzielle Lösungen, beispielsweise die Software Unifeye der metaio GmbH [met-2011a], eingesetzt. Das Markertracking wurde in den letzten Jahren stetig verbessert, so dass beispielsweise partielle Verdeckungen der Marker oder schlechte Lichtverhältnisse nicht mehr zwangsläufig zum Ausfall des Trackings führen [Div-2010].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Analog zum Einsatz von IR-Kameras auf dem Kommissionierwagen kann dessen Position und Ausrichtung auch durch eine Videokamera erfasst werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Regale in regelmäßigen Abständen mit Papiermarkern versehen sind. Im Gegensatz zu IR-Kameras, die aus ergonomischer Sicht nicht einfach am Körper getragen werden können, um ein inside-out Trackingsystem zu realisieren, sind Videokameras auch in kleineren Baugrößen erhältlich. Durch das Tragen der Kamera an der Brust können beispielsweise Papiermarker an den Regalen erfasst werden, um die Position des Kommissionierers zu ermitteln. Wird die Kamera

am Kopf beispielsweise am HMD befestigt, kann in einem mit entsprechenden Markern ausgestatteten Lager auch die Blickrichtung des Kommissionierers bestimmt werden. Eine Kombination des optischen Trackings und der in Abschnitt 5.2.2 vorgestellten optischen Fehlerüberprüfung durch eine Videokamera am Kopf stellt das Konzept 7: „Kopfbasierte Kamera“ dar, das ausführlich in Abschnitt 5.4.7 beschrieben ist.

Beim **markerlosen Tracking** werden hingegen keine speziellen Marker benötigt. Bei dieser Art des videobasierten Trackings erfolgt die Bestimmung der Position und der Ausrichtung eines Objektes allein durch die Erfassung von bekannten Mustern und Geometrien [Alt-2005]. Ein Anwendungsfall hierfür ist die automatische Erkennung von Gebäuden mit einem Smartphone [Ret-2011]. Das Tracking erfolgt bei markerlosen Trackingverfahren in zwei Teilschritten: Zunächst muss eine digitale Umgebungskarte erstellt werden, anschließend ist die Position und Ausrichtung der Kamera bezüglich dieser Karte zu erfassen [Scw-2011].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Als problematisch für den Einsatz eines markerlosen inside-out Trackingsystems in einem Lager könnte sich der Umstand erweisen, dass sich die Umgebung beispielsweise durch die Einlagerung oder Entnahme von Artikeln kontinuierlich verändert. Dadurch kann es vorkommen, dass keine aktuelle Umgebungskarte zur Verfügung steht. Ein weiteres Problem ist insbesondere in Lägern zu erwarten, in denen Regale für die Bereitstellung verwendet werden. Durch sich wiederholende Formelemente, wie z. B. Regalböden oder Steher, ist es nicht immer möglich, eindeutig zu erkennen, welches Regal gerade erfasst wird. Deshalb wird das markerlose Tracking im Forschungsprojekt nicht weiter betrachtet.

5.3.8 Hybrides Tracking

Da für die meisten Anwendungsfälle kein perfektes Trackingsystem existiert, werden in einem hybriden Trackingsystem mehrere Technologien zeitgleich eingesetzt. Ziel des hybriden Trackings ist es, die Schwächen eines Trackingverfahrens mit den Stärken eines anderen zu kompensieren. Eine wesentliche Herausforderung im Zusammenhang mit hybriden Trackingsystemen ist es, den richtigen Wert zu identifizieren, wenn die verwendeten Systeme voneinander abweichende Daten liefern. [Leh-2001]

Häufig besteht ein hybrides Trackingsystem aus einem optischen System, das durch Inertialsensoren ergänzt wird, um die Genauigkeit zu erhöhen [Ret-2011]. Hoffmeyer beschreibt den Einsatz eines IR-Trackingsystems zur Erfassung der Körperhaltung von Werkern bei Montagearbeiten an einer Fahrzeugkarosserie. Dieses wird durch ein inertiales Trackingsystem ergänzt, um auch dann auf Trackingdaten zugreifen zu können, wenn einzelne Targets von Teilen der Karosserie verdeckt werden [Hof-2011].

Konzepte für die Fehlervermeidung mit Pick-by-Vision:

Dieser im Bereich von Montageplätzen vorgeschlagene Lösungsansatz könnte auch im Bereich der Kommissionierung mit Pick-by-Vision angewandt werden, um Verdeckungen von Targets an den Handgelenken durch die Regalgeometrie zu kompensieren.

5.4 Vorausgewählte Konzepte

Aus der Vielzahl der in den Abschnitten 5.2 und 5.3 vorgestellten Lösungsansätze für die Realisierung der Funktion der Fehlervermeidung wurden sieben erfolgversprechende Konzepte vorausgewählt. Diese werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

5.4.1 Konzept 1: Lichtvorhang vor Regal

Das Konzept 1 „Lichtvorhang vor Regal“ wirkt im Kommissionierprozess während des Prozessschrittes Greifen. Verschiedene Sensoren, wie z. B. Laserscanner oder Lichtschranken, die fest vor den Regalfächern installiert sind, ermöglichen es, zumindest den Greifvorgang in das richtige Fach zu verifizieren. Das Konzept der Fehlerüberprüfung mittels eines Laserscanners findet in der Praxis bereits Anwendung, z. B. als Prüfmechanismus spezieller Pick-by-Light Systeme (vgl. Abschnitt 3.3). Ein Laserscanner erfasst hierzu permanent die Regalfront eines oder mehrerer Regalfelder. Befindet sich der Arm des Kommissionierers im überwachten Bereich, so wird dessen Position an einen Rechner übermittelt, der anhand eines Modells der Regalgeometrie überprüft, ob in das richtige Fach gegriffen wurde.

Eine Alternative zum Laserscanner stellen Lichtschranken aus dem Bereich der Automatisierungstechnik dar. Bei einem System der Firma Wenglor wird jede Ebene

des Regals mit einem entsprechenden Modul ausgestattet. Ein Modul besteht aus Reflexionslichtschranken mit einem Strahlabstand von 30 mm. Die Rückseite des Gehäuses ist mit einer reflektierenden Folie versehen. [Wen-2011]

Beim Multi-Order-Picking ist analog zur Überprüfung des Greifens in das richtige Lagerfach durch Sensoren am Regal auch eine Variante vorstellbar, bei der durch einen entsprechenden Sensor am Kommissionierwagen die Ablage der Artikel in den richtigen Sammelbehälter kontrolliert wird. Als Sensoren eignen sich hierfür insbesondere Lichtgitter aus dem Bereich der Automatisierungstechnik.

Abbildung 5-4 zeigt schematisch ein Konzept, bei dem sowohl der Greifvorgang mittels eines Laserscanners als auch die Ablage mittels Lichtschranken überwacht wird.

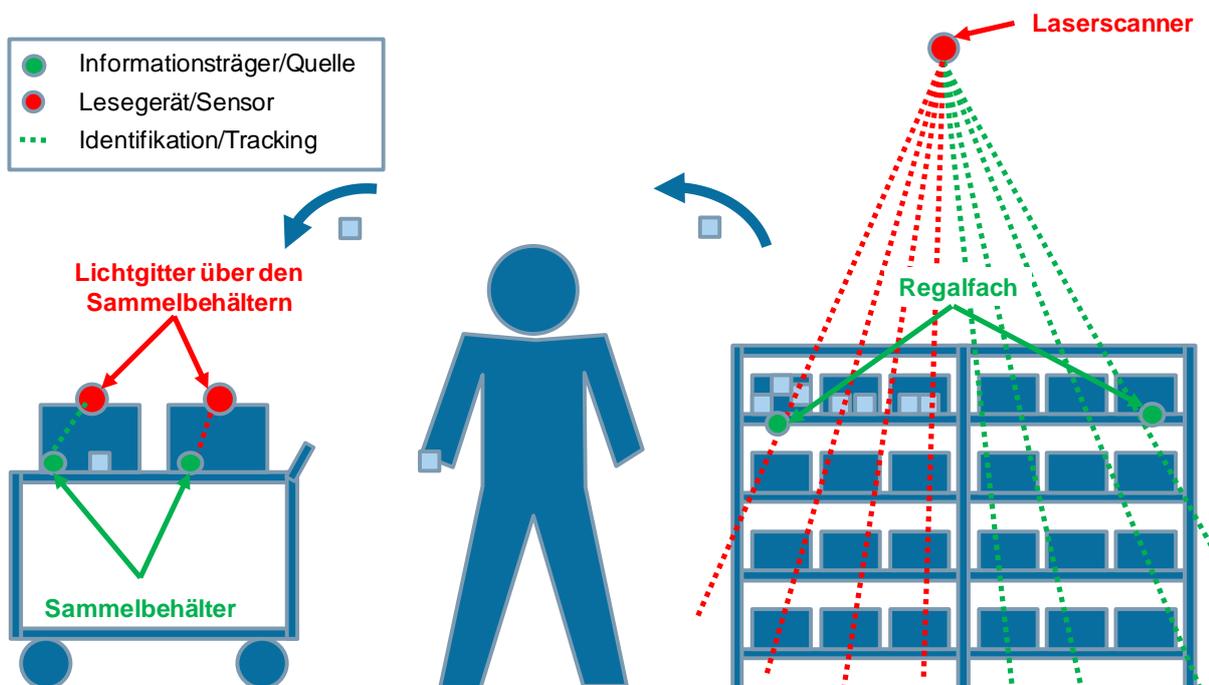


Abbildung 5-4: Konzept 1 (Lichtvorhang vor Regal)

Neben der Überwachung, ob in das richtige Lagerfach gegriffen wird, kann theoretisch die Entnahme auch automatisch quittiert werden. Hierfür ist allerdings (z. B. durch eine entsprechende Arbeitsanweisung) sicherzustellen, dass bei jeder Unterbrechung der Lichtschranke auch genau eine Entnahmeeinheit aus dem Lagerfach gepickt wird. Allerdings ist dies in der Praxis schwierig umzusetzen und widerspricht dem Wunsch nach einer vollständig automatisierten Fehlerüberprüfung ohne einer Mitwirkung Kommissionierers.

Ein wesentlicher Vorteil des Systems ist die permanente automatisierte Überprüfung, die nicht durch den Kommissionierer initiiert werden muss. Bereits in dem Augenblick, in dem der Kommissionierer in ein falsches Lagerfach greift, erhält er eine Rückmeldung im HMD. Da der Kommissionierer keine zusätzlichen Handhabungsschritte zu verrichten hat, bleibt die Bedienung des Systems sehr einfach. Dies trägt auch dazu bei, dass sich der Kommissionierprozess gegenüber einem Prozess ohne Fehlerüberprüfung nicht verlangsamt. Im Gegensatz zu anderen Identifikationsverfahren ist das Konzept 1 weitestgehend unabhängig von Lichtverhältnissen sowie dem Einfluss von metallischen Werkstoffen oder Flüssigkeiten. Das Konzept des Lichtvorhangs vor dem Regal eignet sich auch für die Kommissionierung von Kleinteilen oder Bauteilen ohne einer optischen Codierung, da der Artikel selbst nicht identifiziert wird (vgl. Szenario 1).

Nachteilig ist die aufwendige Installation. In Abhängigkeit von der Auswahl der Sensorik, sind an jedem Lagerfach bzw. in regelmäßigen Abständen Sensoren anzubringen und zu verkabeln. Insbesondere in großen Kommissionierbereichen (vgl. Szenario 3) führt dies zu hohen Investitionskosten. Nicht nur bei dieser Lösung steigen die Investitionskosten mit der Größe des Kommissionierbereichs an. Allgemein verursacht der Mechanismus der Fehlerüberprüfung dann hohe Kosten, wenn teure Systembestandteile, insbesondere Sensoren, in regelmäßigen Abständen im Lager zu installieren sind. Besonders negativ auf die Wirtschaftlichkeit wirkt sich dieser Umstand in Lägern mit einem hohen Anteil an Langsamdrehern aus, da auch solche Bereiche mit Sensorik ausgestattet werden müssen, in denen nur wenige Picks ausgeführt werden. Deshalb wurden auch Konzepte vorausgewählt, bei denen teure Sensoren oder Lesegeräte mobil eingesetzt werden. Neben dem Installationsaufwand entsteht auch zusätzlicher Aufwand für die Erstellung eines Geometriemodells des Lagers in rechnerlesbarer Form, wenn nicht jedes Lagerfach mit einem unabhängigen Lichtgitter ausgestattet ist. Nicht nur bei der Inbetriebnahme ist es erforderlich, die relevanten Abmessungen der Regale zu erfassen, sondern auch bei Anpassungen, beispielsweise bei der Höhenänderung von Regalböden, ist es notwendig, das Modell zu aktualisieren.

Zwar trägt das Konzept 1 dazu bei, Typfehler zu reduzieren, bietet aber kaum eine Möglichkeit, Mengenfehler zu identifizieren. Auch Typfehler, die aufgrund falscher Einlagerung entstehen, können auf diese Weise nicht entdeckt werden.

Problematisch ist der Fall zu sehen, wenn mehrere Kommissionierer gleichzeitig in einem Bereich des Lagers arbeiten, denn eine eindeutige Zuordnung eines vom Sensor identifizierten Greifvorgangs zu dem jeweiligen Kommissionierer ist nicht möglich.

5.4.2 Konzept 2: Waage auf Kommissionierwagen

Bei dem in Abbildung 5-5 dargestellten Konzept handelt es sich um den mobilen Einsatz einer Waage auf dem Kommissionierwagen. Die Waage befindet sich unter dem Sammelbehälter, so dass dessen Gewicht während bzw. unmittelbar nach dem Prozessschritt Ablage kontrolliert werden kann.

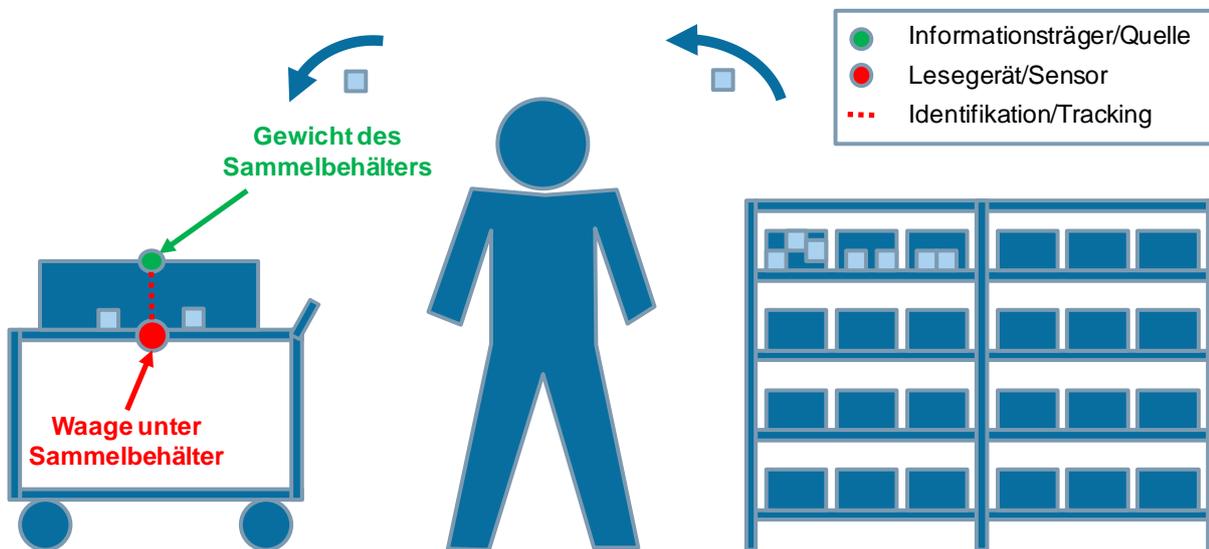


Abbildung 5-5: Konzept 2 (Waage auf Kommissionierwagen)

Im Gegensatz zum klassischen Zählwiegen mittels Tara und Referenzgewicht [ide-2012] ist die Waage über eine entsprechende kabellose Schnittstelle mit dem mobilen Rechner am Körper des Kommissionierers verbunden. Wird die Waage zum Zählwiegen verwendet, wird auf entsprechende Gewichtsdaten der Artikel in den Stammdaten des WMS zurückgegriffen. Neben dem Ermitteln der Stückzahl kann die Waage auch verwendet werden, um zu überprüfen, ob der richtige Artikel entnommen wurde. Allerdings muss hierfür ein geeignetes Sortiment vorliegen. Sind überwiegend Artikel vorhanden, die gleich oder ähnlich schwer sind, bzw. deren Gewicht ein Vielfaches eines anderen Artikels ist, so findet nur eine Plausibilitätsprüfung, nicht aber eine echte Identifikation statt.

Sind mehrere Sammelbehälter vorhanden, kann auch die Ablage in den richtigen Behälter überprüft werden, indem Wägezellen unter jedem Sammelbehälter verwendet werden.

Durch die Plausibilitätsprüfung des Gewichts ist von einer Reduktion von Mengenfehlern und ggf. auch Typfehlern auszugehen, auch wenn keine echte 100 %-Kontrolle möglich ist. Deshalb kann es gerade bei diesem Konzept hilfreich sein, die Wägetechnik mit weiteren Verfahren der Fehlervermeidung zu kombinieren. So könnten beispielsweise das Konzept 1 zur Überprüfung der Identität und Konzept 2 zur Bestimmung der Stückzahl kombiniert werden.

Wie beim Konzept 1 erfolgt keine Identifikation einzelner Artikel, die üblicherweise das Vorhandensein von optischen Codes oder RFID-Transpondern voraussetzt. Deshalb eignet sich dieses Konzept auch dann, wenn Kleinteile oder andere Artikel, die nicht mit einem zusätzlichen Informationsträger versehen sind, überprüft werden sollen.

Da der Kommissionierer nicht in seinem natürlichen Bewegungsverhalten eingeschränkt wird, und kein zusätzlicher Handhabungsschritt für die Kontrolle notwendig ist, ist das System sehr einfach zu bedienen. Zu einer Verlangsamung des Kommissionierprozesses durch den Prüfmechanismus kommt es dennoch durch das Einschwingen der Waage. Die Einschwingzeit beträgt zwei Sekunden oder mehr [Pro-1994]. Insbesondere, wenn sehr hohe Stückzahlen zu ermitteln sind, bietet dieses Konzept dennoch eine Zeitersparnis gegenüber anderen Verfahren zur Bestimmung der Stückzahl.

Nachteilig ist die Störanfälligkeit von Waagen. Für exakte Messungen ist es erforderlich, dass die Waage horizontal und ruhig aufgestellt wird. Insbesondere beim mobilen Einsatz auf einer Waage kann dies nicht immer sichergestellt werden. Während leichte Schwingungen lediglich zu Messfehlern führen, können stärkere Schwingungen oder Stöße, insbesondere bei hohem Gewicht auf der Waagenplattform zur Beschädigung der Waage führen. Weitere Einflussfaktoren auf ein korrektes Ergebnis der Fehlerüberprüfung sind neben der Aufstellung der Waage auch Fertigungsabweichungen bei bestimmten Produkten, Feuchtigkeit in Kartonverpackungen und richtige Artikelgewichte in den Stammdaten des WMS sowie die Auswahl einer geeigneten Waage. In Abhängigkeit vom Sortiment und der Auftragsstruktur kann sich diese Auswahl als schwierig erweisen, da Waagen, die für die Beaufschlagung mit einem hohen Gewicht geeignet sind, oft nur eine geringe Genauigkeit aufweisen.

Die Auswahl einer geeigneten Waage im Spannungsfeld zwischen maximalem Wiegebereich und Genauigkeit kann vereinfacht werden, indem der Sammelbehälter nicht direkt auf einer Waage abgestellt wird, sondern die Waage und der Behälter nebeneinander auf dem Kommissionierwagen positioniert werden. Bereits heute werden Waagen meist stationär, in Einzelfällen auch mobil, auf diese Weise eingesetzt, um beispielsweise im Kleinteilebereich größere Stückzahlen zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3.3). Häufig werden die Artikel nach dem Wiegevorgang beispielsweise in einen Kunststoffbeutel verpackt und anschließend in den Sammelbehälter gegeben. Allerdings ist bei dieser Variante ein zusätzlicher Handhabungsschritt für die Fehlerüberprüfung notwendig.

5.4.3 Konzept 3: RFID-Handschuh

Das Konzept 3 „RFID-Handschuh“ basiert auf dem Einsatz eines mobilen RFID-Lesegerätes. Die schematische Darstellung des Konzeptes in Abbildung 5-6 veranschaulicht den Aufbau und die Funktionsweise des Konzeptes. Die Bereitstellereinheiten im Regal sind mit RFID-Transpondern versehen. Der Kommissionierer trägt ein mobiles RFID-Lesegerät in Form eines Handschuhs (vgl. Abbildung 5-7) am Handgelenk, um zu überprüfen ob er in das richtige Fach greift. Bei der Entnahme eines Artikels aus einem Lagerfach bewegt der Kommissionierer während des Greifvorgangs den RFID-Handschuh in den Sende-/Empfangsbereich des Transponders. Dadurch erfolgt automatisch und ohne einen zusätzlichen Handhabungsschritt des Nutzers die Überprüfung und ggf. Bestätigung der Entnahme [Gün-2011c].

Die Untersuchung dieses Konzeptes war auch Bestandteil des IGF-Forschungsprojektes 15666 N „Papierlose Produktion und Logistik“. Es wurde festgestellt, dass sich hinsichtlich der erforderlichen Lesereichweite und Datenübertragungsrate sowie der Anforderung, die Transponder auf Ladehilfsmitteln möglichst bereichsübergreifend verwenden zu können, passive UHF-Transponder am besten eignen. Die Nachteile des UHF-Bereiches, die auf die Empfindlichkeit gegenüber dem menschlichen Wassergehalt zurückzuführen sind, sollten durch die konstruktive Gestaltung des RFID-Handschuhs weitestgehend kompensiert werden. [Gün-2011c]

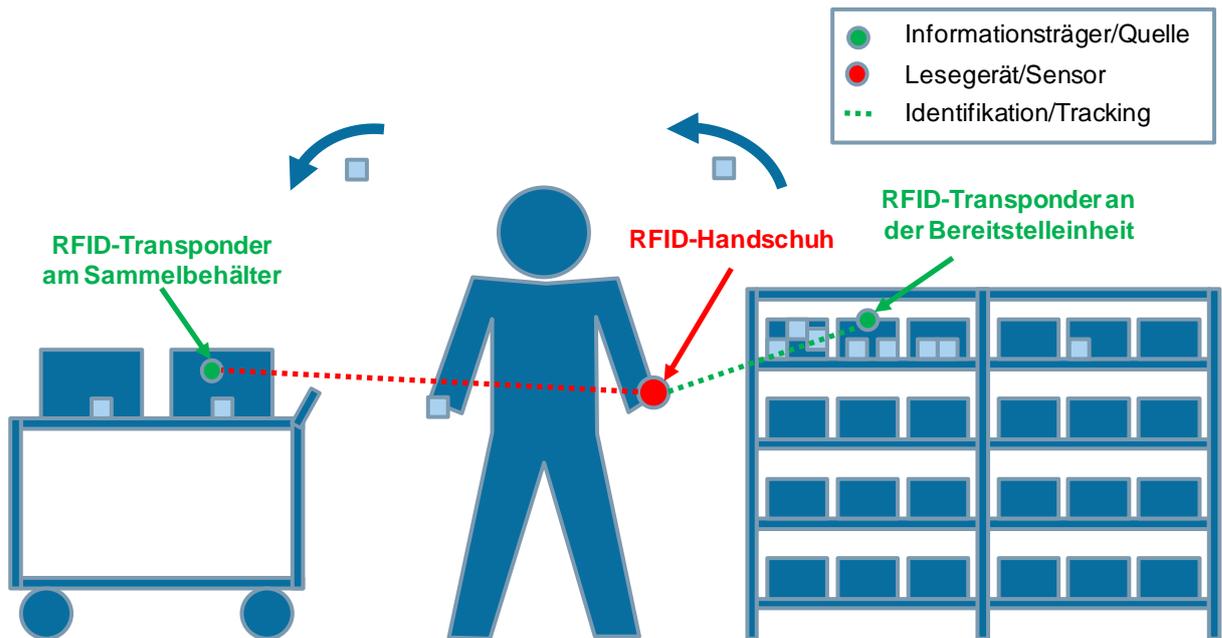


Abbildung 5-6: Konzept 3 (RFID-Handsuh)

Als Schreib-/Lesegerät findet im Forschungsprojekt „Papierlose Produktion und Logistik“ der in Abbildung 5-7 gezeigte mobile RFID-Reader UDL15 Verwendung, ein Vorserienmodell der Deister electronic GmbH. Das Lesegerät wird am Handgelenk getragen, die Antenne befindet sich am Fingerrücken. Durch die Verlagerung der RFID-Antenne an die Finger des Nutzers werden nur die Transponder gelesen, mit denen auch tatsächlich interagiert wird.



Abbildung 5-7: RFID-Handsuh [Gün-2011c]

Die Grundfunktion des mobilen RFID-Lesegerätes besteht darin, die aus den Transpondern gelesenen Daten kabellos über eine Bluetooth-Schnittstelle an einen Rech-

ner weiterzuleiten, der die Auswertung und Interpretation der Transponderdaten durchführt. Neben dem mobilen Lesegerät, der Fingerantenne und der Kommunikationseinheit ist auch die Energieversorgung im Handschuh integriert.

Ein wesentlicher Vorteil des Konzeptes ist, dass für die Interaktion mit dem System kein zusätzlicher Handhabungsschritt erforderlich ist. Für den Kommissionierer ergibt sich keine Veränderung der natürlichen Bewegungsabläufe und der Kommissionierprozess wird dadurch nicht verlangsamt.

Nachteilig wirkt sich hingegen das Tragen des Handschuhs am Handgelenk aus. Neben dem zusätzlichen Gewicht am Arm besteht die Gefahr, mit dem Gehäuse des Lesegerätes am Regal hängen zu bleiben.

Auch bei diesem Konzept wird analog zum Konzept 1 „Lichtvorhang vor Regal“ der Griff in das richtige Lagerfach überprüft. Allerdings ergeben sich durch die Verwendung des RFID-Handschuhs einige Vorteile. Die teure Sensorik ist nicht an den Regalfächern angebracht, sondern wird vom Kommissionierer am Körper getragen. Dadurch können auch in größeren Kommissionierbereichen die Investitionskosten niedrig gehalten werden. Mehrere Kommissionierer können auch auf engem Raum gleichzeitig arbeiten ohne der Gefahr, dass es zu Fehllesungen kommt.

Das Potenzial dieses Konzeptes konnte im IGF-Forschungsprojekt „Papierlose Produktion und Logistik“ gezeigt werden. Im Rahmen von Probandenversuchen wurde durch die Verwendung des RFID-Handschuhs im Vergleich zur klassischen Belegkommissionierung eine um 59 % niedrigere Fehlerquote erreicht, ohne dass die Kommissionierleistung dabei sank [Gün-2011c].

Es hat sich also gezeigt, dass durch dieses Konzept die Fehlerquote stark reduziert werden kann, aber dennoch Fehler auftreten können. Allein durch die Überprüfung, dass in den richtigen Behälter gegriffen wurde, kann nicht festgestellt werden, ob es sich tatsächlich um den richtigen Artikel oder die korrekte Anzahl handelt, und ob beim Vorhandensein mehrerer Sammelbehälter in den richtigen Sammelbehälter abgelegt wurde. Deshalb lassen sich von diesem Konzept im Hinblick auf die Erkennung weiterer Fehlertypen die folgenden Varianten hinsichtlich der Anbringung der Transponder ableiten, die sich auch miteinander kombinieren lassen:

- Kennzeichnung der Bereitstellereinheit
- Kennzeichnung des Lagerfachs am Regal

- Kennzeichnung der einzelnen Artikel
- Kennzeichnung der Sammelbehälter

Als Alternative zur Kennzeichnung der Bereitstellereinheit kann auch das Lagerfach direkt mit einem Transponder am Regal versehen werden. Eine weitere Variante ist die Kennzeichnung jedes einzelnen Artikels mit einem Transponder. Auf diese Weise können Typ-, Mengen- und Auslassungsfehler sicher erkannt werden. Allerdings ist heute für viele Anwendungen die Anbringung von Transpondern an jedem einzelnen Artikel zu teuer. Deshalb könnte auch die Kombination des ursprünglichen Konzeptes 3 mit dem Konzept 2, bei dem die Stückzahl mittels einer Waage ermittelt wird, ein vielversprechender Ansatz sein. Analog zu den Bereitstellereinheiten können, wie in Abbildung 5-6 schematisch dargestellt, auch die Sammelbehälter mit Transpondern versehen werden, um die Ablage in den richtigen Behälter zu überprüfen.

5.4.4 Konzept 4: Kommissionierwagen mit Identsystem

Im Gegensatz zur Verwendung einer Waage auf dem Kommissionierwagen erlaubt das Konzept 4 „Kommissionierwagen mit Identsystem“ nicht nur eine Plausibilitätskontrolle sondern die Identifikation jedes einzelnen Artikels auf dem Kommissionierwagen. Hierfür wird ein Lesegerät, z. B. ein RFID-Lesegerät, in den Kommissionierwagen integriert, das die Artikel während bzw. unmittelbar nach der Ablage identifiziert (vgl. Abbildung 5-8) und automatisch quittiert. Voraussetzung hierfür ist, dass jeder Artikel mit einem RFID-Transponder versehen ist.

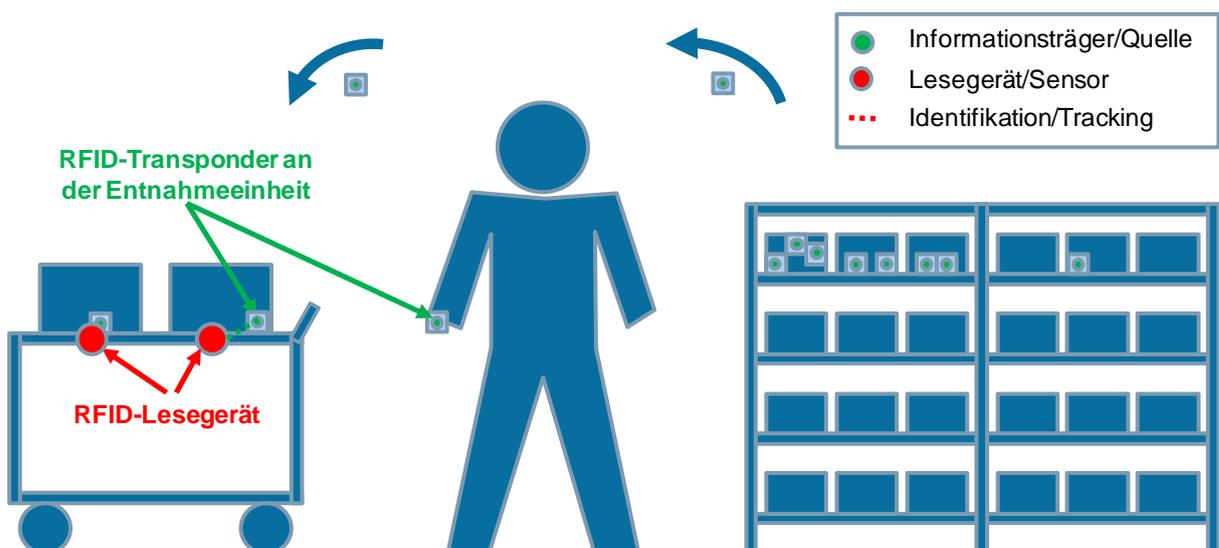


Abbildung 5-8: Konzept 4 (Kommissionierwagen mit Identsystem)

Über eine drahtlose Verbindung (z. B. WLAN oder Bluetooth) ist das System auf dem Kommissionierwagen mit dem mobilen Rechner am Körper des Kommissionierers verbunden. Der Argumentation in Abschnitt 5.4.3 folgend, eignet sich auch für das Konzept 4 ein System im UHF-Bereich mit passiven Transpondern.

Wenn die Ablage in mehrere Sammelbehälter erfolgt, kann durch die Anbringung mehrerer Lesegeräte auch die korrekte Ablage überprüft werden. Allerdings ist dann der Kommissionierwagen konstruktiv so zu gestalten, dass keine Überschneidung der Lesfelder beider Reader auftritt.

Durch die Anbringung des Systems der Fehlerüberprüfung am Kommissionierwagen ergeben sich zwei wesentliche Vorteile. Zum einen hat der Kommissionierer am Körper kein zusätzliches Gewicht zu tragen und wird nicht in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt, zum anderen ist es nicht erforderlich, das Lager mit teurer Sensorik auszustatten, was insbesondere die Investitionskosten in größeren Lagerbereichen niedrig hält. Zusätzliche Handhabungsschritte, die den Kommissionierprozess verlangsamen würden, sind nicht erforderlich. Außerdem ermöglicht das Konzept 4 die Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung, denn es können sowohl Typ-, Mengen- als auch Auslassungsfehler erkannt werden.

Einschränkungen ergeben sich durch die physikalischen Grenzen der RFID-Technologie. Das Lesefeld eines RFID-Readers hängt u. a. von den Materialien in dessen Umgebung ab. So können metallische Objekte dazu führen, dass nicht alle relevanten Transponder erfasst werden. Andererseits können Reflexionen und Überreichweiten auftreten, durch die auch Transponder an Artikeln erfasst werden, die tatsächlich nicht auf dem Kommissionierwagen, sondern beispielsweise im Regal liegen.

Die Voraussetzung für die Realisierung dieses Prüfsystems ist, dass alle Artikel einzeln mit einem Transponder versehen sind. Wie beim Konzept 3 ist auch hier problematisch, dass dies für viele Anwendungen mit zu hohen Kosten verbunden ist. Insbesondere für die Kommissionierung von Kleinteilen eignet sich das Konzept des RFID-Readers auf dem Kommissionierwagen nicht.

Neben der RFID-Technologie sind hinsichtlich des eingesetzten Ident-Verfahrens auch Varianten auf Basis der optischen Identifikation mittels Videokamera und eines 3D-Laserscanners denkbar. Bei der Variante mittels optischer Identifikation erfasst

eine Kamera am Kommissionierwagen, wie in Abbildung 5-9 gezeigt, die optischen Codierungen der Artikel.

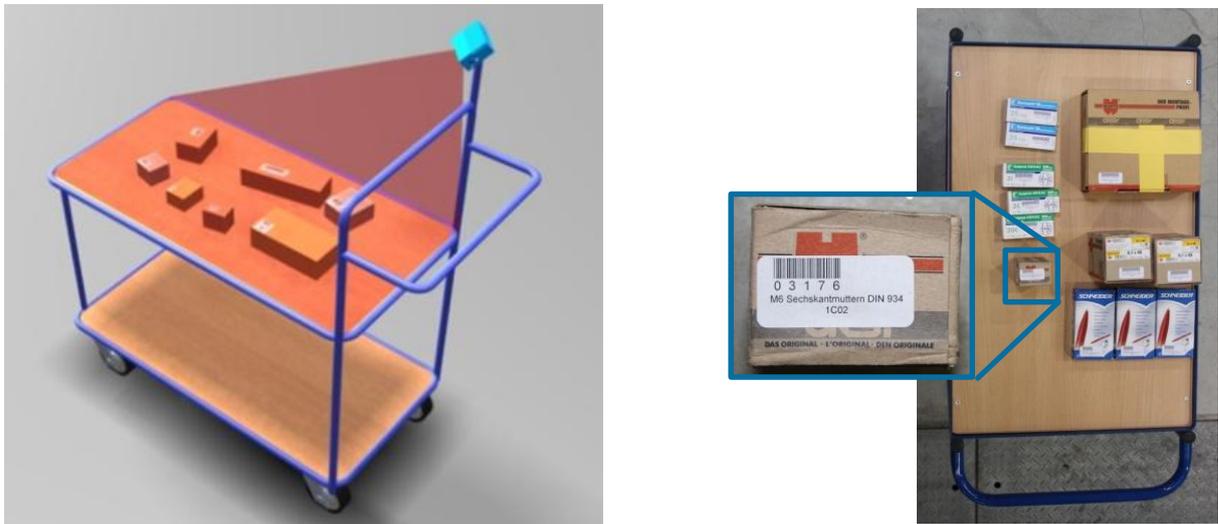


Abbildung 5-9: Variante des Konzeptes 4 mit Videokamera zur Erfassung optischer Codes

Vorteil dieser Lösung ist der definierte Erfassungsbereich der Kamera, durch den Fehllesungen weitgehend verhindert werden können. Allerdings ist es für die Barcode-Lesung erforderlich, dass ein Artikel auf jeder Seite mit einem Barcode versehen ist, oder der Kommissionierer bei der Ablage eigenverantwortlich sicherstellt, dass der Code von der Kamera erfasst werden kann. Beobachtungen in mehreren Kommissioniersystemen zeigten, dass erfahrene Kommissionierer auch bei der klassischen Belegkommissionierung die Artikel oftmals mit dem Etikett nach oben auf den Wagen ablegen, so dass sie diese einfach mit der mitgeführten Papierliste vergleichen können.

Ein wesentlicher Nachteil ist, dass wie bei der Variante mit dem RFID-Reader jeder Artikel mit einem Informationsträger versehen sein muss. Insbesondere Kleinteile erfüllen diese Voraussetzung nicht. Außerdem muss hinsichtlich der Abmessungen ein homogenes Artikelspektrum vorliegen, da es sonst zur Verdeckung kleinerer Artikel kommen kann. Im Gegensatz zur RFID-Technologie spielt der Einfluss metallischer Objekte keine Rolle, jedoch erfordert die optische Erkennung mittels Videokamera ausreichende Lichtverhältnisse.

Eine weitere Variante besteht im Einsatz eines 3D-Laserscanners. Dieser kann wie die Kamera dazu verwendet werden, optische Codes auf den Artikeln auszuwerten. Außerdem ist es möglich, durch die Abtastung der Oberfläche eine dreidimensionale Punktwolke zu erzeugen. Durch deren Auswertung kann eine Plausibilitätsprüfung

durchgeführt werden, um zu ermitteln, ob es sich anhand der Abmessungen um den richtigen Artikel handelt.

5.4.5 Konzept 5: IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms

Das Konzept 5 „IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms“ basiert auf einem Funktionsmuster, das im Rahmen des IGF-Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ realisiert wurde. Bei diesem System wird die Position und die Ausrichtung des Kopfes von IR-Trackingkameras erfasst, um perspektivisch richtig Informationen zur Wegfindung im Lager einblenden zu können. Zusätzlich zur Erfassung des Kopfes (vgl. Abbildung 2-4, Seite 27) ist es möglich, durch das Anbringen von Targets an den Handgelenken die Bewegungen der Hände des Kommissionierers zu überwachen. Abbildung 5-11 links zeigt ein Beispiel solcher Targets, die bereits zur Interaktion in VR-Umgebungen verwendet werden.

Durch die Analyse der Bewegungskurven während der Prozessschritte „Greifen“ und „Ablegen“ kann überprüft werden, ob der Kommissionierer in das richtige Lagerfach greift bzw. die entnommenen Artikel in den richtigen Sammelbehälter ablegt. Die Abbildung 5-10 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen IR-Trackingsystems zur Erfassung des Kopfes und der Hand des Kommissionierers.

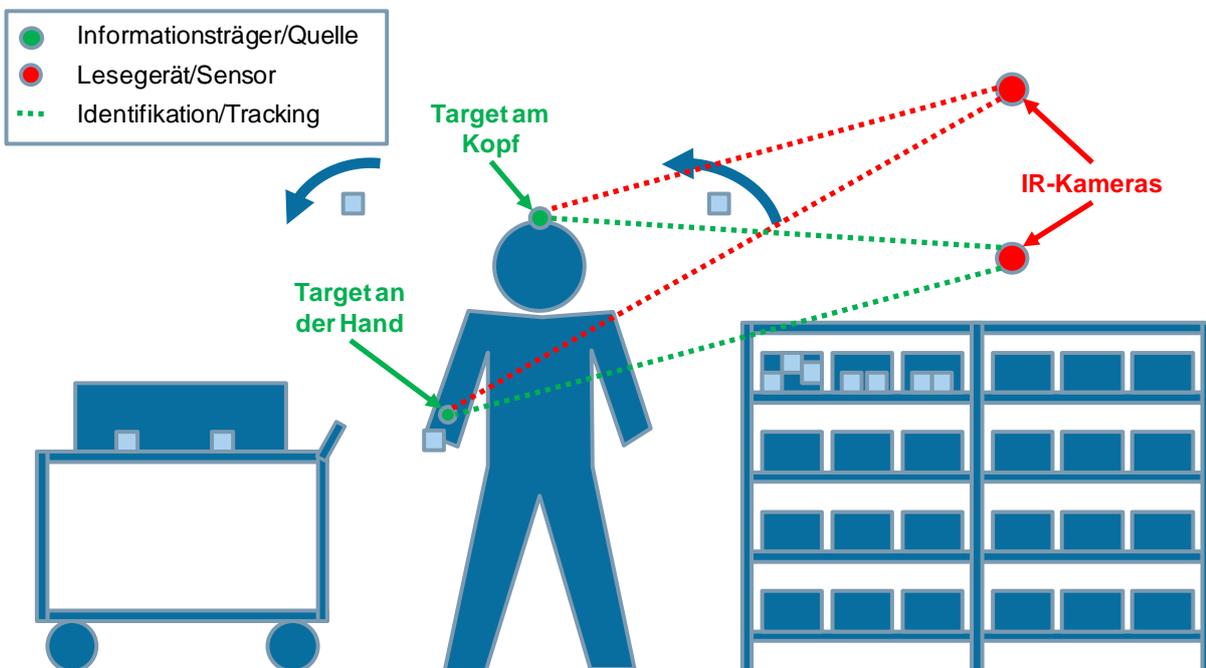


Abbildung 5-10: Konzept 5 (IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms)

Das Trackingsystem arbeitet nach dem Prinzip Outside-in, d. h. für die Realisierung des Trackingsystems wird eine ausreichende Anzahl an IR-Trackingkameras benötigt. Im Projekt „Pick-by-Vision“ waren drei Kameras pro Lagergasse notwendig, um den Kopf des Kommissionierers zu erfassen. Insbesondere sind diese so zu positionieren, dass die Targets nicht vom Körper bzw. der Regalgeometrie verdeckt werden.

Verdeckungen durch die Regalgeometrie beim Greifvorgang sind insbesondere dann zu erwarten, wenn das Target am Handgelenk angebracht ist. Um sicherzustellen, dass stets eine ausreichende Anzahl an Markern erkannt wird, müssen diese einen gewissen Abstand vom Armband aufweisen (vgl. Abbildung 5-11 rechts). Dadurch kann es bei engen Platzverhältnissen zur Einschränkung der Bewegungsfreiheit kommen. Abbildung 5-11 rechts zeigt beispielsweise eine Situation, in der der Kommissionierer mit dem Target am Regal hängenbleiben kann.



Abbildung 5-11: Target am Handgelenk des Nutzers zur Interaktion in einer VR-Umgebung (links) und in der AR-unterstützten Kommissionierung (rechts)

Eine Alternative zum Tragen eines Targets am Handgelenk stellt die Befestigung am Unterarm dar, der nicht in die Regalfront eintaucht. Dadurch wird zwar die Gefahr des Hängenbleibens und der Verdeckung der Targets reduziert, jedoch ist es schwieriger, zu bestimmen, wohin die Hand greift. Da die übliche Befestigung des Targets, ein elastisches Armband, nur durch Reibschluss am Arm des Benutzers fixiert werden kann, kann es nicht exakt positioniert werden. Der für das Greifen relevante Punkt der Hand hängt zudem von den anthropometrischen Eigenschaften des Hand-Arm-Systems des jeweiligen Kommissionierers, und somit von der Körpergröße ab. Zwar kann der Abstand zwischen der Hand und dem Target beim An-

legen des Targets gemessen werden, jedoch besteht die Gefahr, dass das Target während der Arbeit in Längs- bzw. in Umfangsrichtung am Unterarm verrutscht.

Erfahrungen von Industriepartnern haben gezeigt, dass passive IR-Marker allgemein leicht verschmutzt und beschädigt werden können und deshalb im dauerhaften Industrieinsatz oft ausgetauscht werden müssen. Alternativen sind aktive Targets. Sie können bei gleicher Erkennungswahrscheinlichkeit mit kleinerem Durchmesser gewählt und dadurch auch an besser geschützten Stellen eingebaut werden. Sie benötigen jedoch eine zusätzliche Energieversorgung, die am Körper mitgeführt werden muss.

Wie beim Konzept 1 kann mit diesem Konzept lediglich der Griff in das richtige Regalfach bzw. die richtige Ablage überprüft werden. Im Gegensatz zu Konzept 1 können jedoch auch mehrere Kommissionierer in einem Bereich arbeiten. Dabei ist darauf zu achten, dass es nicht zu Verdeckungen durch andere Personen im Umfeld kommt, und eine eindeutige Unterscheidung der Targets durch eine entsprechende Anordnung der Marker gewährleistet ist. Abhängig davon, ob der Greifvorgang oder der Ablagevorgang überprüft werden soll, muss die Geometrie des Regals, des Kommissionierwagens und der Sammelbehälter in rechnerlesbarer Form vorliegen und bei Änderungen entsprechend aktualisiert werden.

Im Vergleich zu anderen Trackingverfahren ist das outside-in IR-Trackingsystem robust, genau und schnell [Gün-2009], verursacht aber einen hohen Investitionsaufwand, insbesondere in großen Kommissionierbereichen, in denen sehr viele IR-Kameras benötigt werden, um eine ausreichende Abdeckung des Trackings zu gewährleisten. Ein wesentlicher Vorteil des Konzeptes 5 ist, dass eine einzige Trackingtechnologie ausreicht, um sowohl die perspektivisch richtige Informationsbereitstellung als auch das Subsystem der Fehlerüberprüfung zu realisieren.

5.4.6 Konzept 6: Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen

Das Konzept 5 bietet durch den Einsatz eines IR-Trackingsystems zahlreiche Vorteile. Allerdings verursacht eine Umsetzung des Konzeptes in großen Kommissionierbereichen sehr hohe Investitionskosten. Deshalb wurde ein Konzept erarbeitet, bei dem die Vorteile des IR-Trackings und des Prinzips inside-out, bei dem nur wenige Kameras benötigt werden, kombiniert werden können. Beim Konzept 6: „Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen“ werden die teuren Kameras auf dem Kommissionierwagen mitgeführt. Wie beim Konzept 5 trägt der Kommissionierer Targets am

Handgelenk bzw. Unterarm und am Kopf. Darüber hinaus ist auch das Lager in regelmäßigen Abständen mit passiven IR-Targets ausgestattet. Im Prinzip entspricht das Konzept 6 dem Konzept 5, mit dem Unterschied, dass nun die Position und Ausrichtung der Targets relativ zum Kommissionierwagen anstatt in Bezug auf das Lager bestimmt werden.

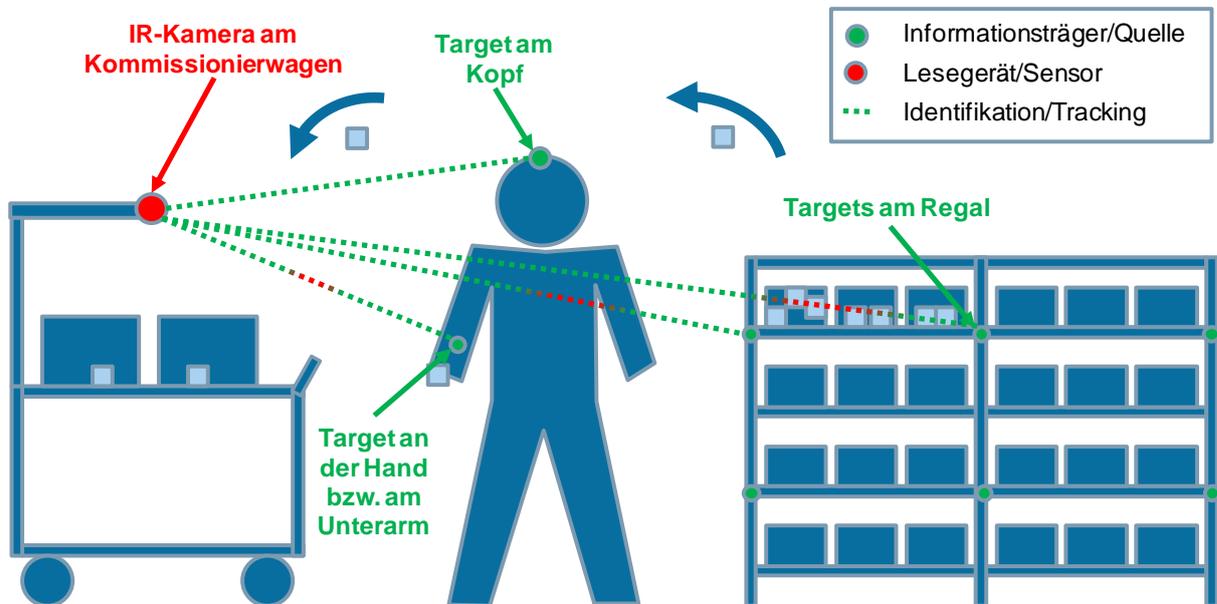


Abbildung 5-12: Konzept 6 (Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen)

Die Anbringung von Targets an den Regalen erlaubt die freie Beweglichkeit des Kommissionierwagens in der Gasse, d. h. zusätzlich zur Bewegung in Längsrichtung ist auch eine Bewegung nach rechts bzw. links und eine Drehung um die Hochachse möglich. Wird auf diese Beweglichkeit verzichtet, und der Wagen innerhalb der Lagerassen beispielsweise entlang einer Schiene an der Decke geführt, reduziert sich das Tracking auf ein eindimensionales Problem. In diesem Fall können auch industrielle Längenmesssysteme eingesetzt werden, um die Position des Wagens zu ermitteln.

Analog zu den ortsfest im Lager installierten IR-Kameras in Konzept 5 kann auch Konzept 6 sowohl für die perspektivisch richtige Informationsbereitstellung als auch für die Fehlerüberprüfung verwendet werden. Auch die Varianten hinsichtlich der Auswahl und Positionierung der Targets und die Vor- und Nachteile des Konzeptes 5 lassen sich auf Konzept 6 übertragen. Davon abweichend ermöglicht das mobile IR-Tracking auf dem Kommissionierwagen eine deutliche Reduktion der Anzahl der IR-Kameras, insbesondere in großen Kommissionierbereichen.

Als weiterer Nachteil muss in Kauf genommen werden, dass Reflexionen oder Störungen durch andere Lichtquellen, die bei ortsfest installierten IR-Kameras durch die Trackingsoftware kompensiert werden, wenn deren Position bekannt ist, bei der mobilen Lösung zufällig auftreten können.

5.4.7 Konzept 7: Kopfbasierte Kamera

Das in Abbildung 5-13 schematisch dargestellte Konzept 7 basiert auf dem Einsatz eines markerbasierten Trackingsystems nach dem Prinzip inside-out. Der Kommissionierer trägt hierbei eine kopfbasierte Videokamera, die Papiermarker am Regal erfasst und somit die Bestimmung der Position und der Ausrichtung des Kopfes ermöglicht. Das Videobild der Kamera kann auch dazu genutzt werden, eine optische Codierung des Artikels zu identifizieren, der unmittelbar nach dem Greifvorgang in der Hand gehalten wird.

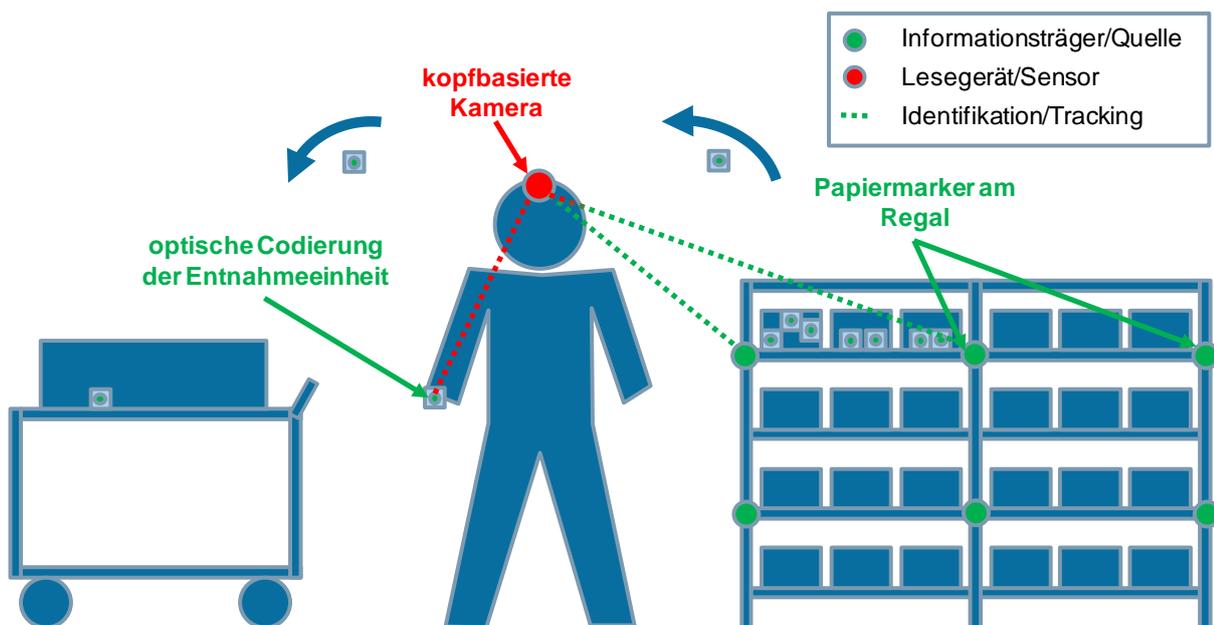


Abbildung 5-13: Konzept 7 (Kopfbasierte Kamera)

Abbildung 5-14 veranschaulicht die Arbeit mit dem System. Der entnommene Artikel wird für die automatische Überprüfung so ausgerichtet und in das Blickfeld gehalten, wie der Kommissionierer ihn halten würde, wenn er diesen auf herkömmliche Weise selbst vergleichen würde. Das Lesen und Vergleichen wird jedoch vom Prüfsystem übernommen und der Kommissionierer erhält unmittelbar eine Anweisung im HMD in der in Abbildung 5-14 rechts unten gezeigten Form. In diesem Fall stimmt

die Artikelnummer nicht überein und der Kommissionierer wird aufgefordert, diesen zurückzulegen.

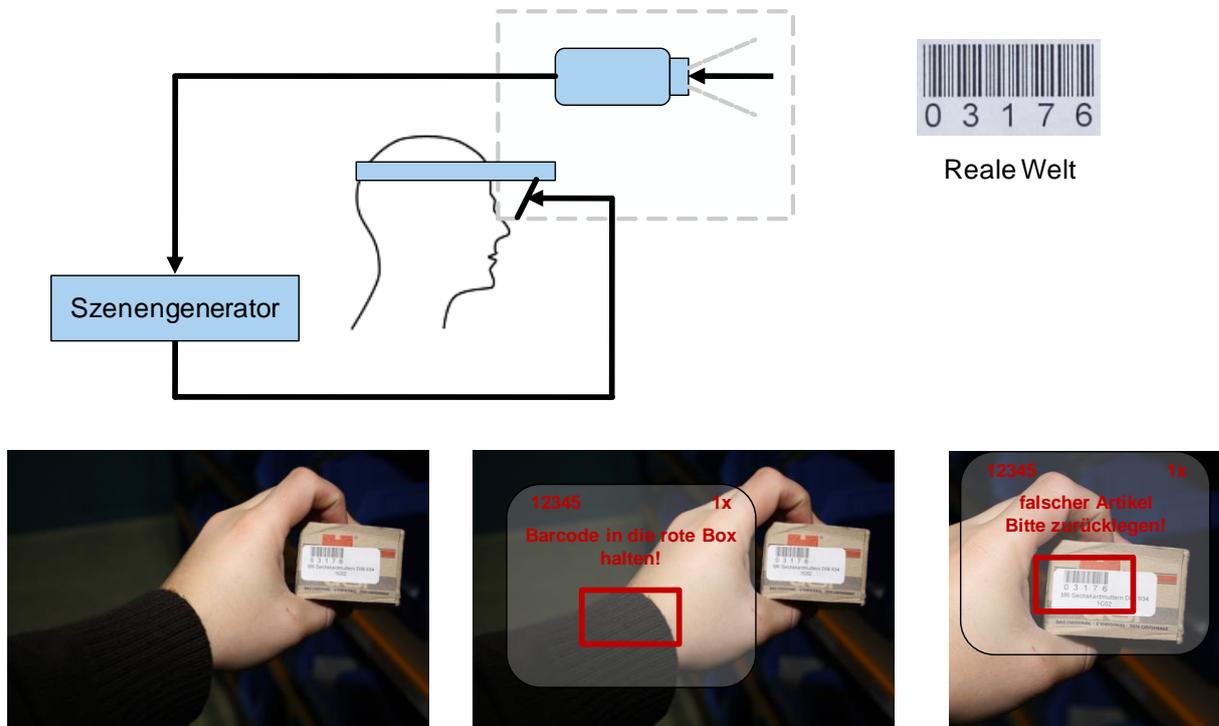


Abbildung 5-14: Systemaufbau und Vorgehensweise bei der Fehlerüberprüfung mittels kopfbasierter Kamera

Die Vorteile der kopfbasierten Kamera lassen sich anhand des Vergleichs mit existierenden Pick-by-Vision Systemen und mit dem Scannen von Barcodes mittels eines Handscanners verdeutlichen. Ist es beispielsweise aus Sicherheitsgründen erforderlich, jede einzelne Entnahmeeinheit zu überprüfen, wird diese Überprüfung bei existierenden Pick-by-Vision Systemen eigenverantwortlich vom Kommissionierer durchgeführt. In Abschnitt 5.1 wurde erläutert, dass die Möglichkeit, die virtuelle und die reale Artikelnummer einfach vergleichen zu können, zwar den Kommissionierer unterstützt, aber dennoch Fehler auftreten können. Insbesondere bei der Entnahme hoher Stückzahlen ist auch der Zeitaufwand für das Lesen und Vergleichen der Artikelnummer nicht zu unterschätzen. Um den Zeitaufwand bei der Fehlerüberprüfung zu reduzieren und die Fehlervermeidung zu verbessern, werden beispielsweise bei der Kommissionierung mit MDTs oftmals Handscanner verwendet. Allerdings fällt auch beim Barcode-Scannen ein zusätzlicher Handhabungsaufwand gegenüber einem Kommissionierprozess ohne Fehlerüberprüfung an.

Den Nachteilen der beiden genannten Maßnahmen zur Fehlervermeidung kann durch den Einsatz einer kopfbasierten Kamera entgegengewirkt werden. Der Scan-

vorgang erfolgt hierbei automatisch und der Kommissionierer hat beide Hände für die eigentliche Kommissionieraufgabe zur Verfügung. Dadurch, dass der Kommissionierer beim Einsatz der kopfbasierten Kamera keine langen Zeichenketten vergleichen oder zusätzliche Scanvorgänge mit einem Handscanner ausführen muss, wird der Kommissionierprozess durch die Fehlerüberprüfung nicht wesentlich verlangsamt. Vorteilhaft ist auch die Möglichkeit, das markerbasierte Tracking für die Werkerführung mit der Funktion der Codelesung in einem einzigen System zu kombinieren. Dadurch, dass lediglich eine Videokamera (ggf. eine kostengünstige Webcam), Papiermarker und Barcode-Etiketten – sofern die Barcodes nicht bereits in das Verpackungsdesign integriert sind – erforderlich sind, ist der Investitionsaufwand gering. Insbesondere gilt dies für den Einsatz in großen Kommissionierbereichen.

Allerdings ist wie bei den Konzepten 5 und 6 ein aktuelles Geometriemodell des Lagers in rechnerlesbarer Form erforderlich. Nachteilig ist auch die Anforderung zu sehen, dass jeder Artikel mit einem optischen Code versehen sein muss. Insbesondere bei Kleinteilen ist diese Voraussetzung meist nicht erfüllt. Das zusätzliche Gewicht der Kamera am Kopf kann sich nachteilig auf die Ergonomie auswirken. Deshalb ist bei der Auswahl der Kamera auf ein geringes Gewicht zu achten.

Das System ermöglicht es, Typ-, Mengen- und Auslassungsfehler zu verhindern. Analog zum Scannen von Barcodes mit einem Handscanner wird auch beim Konzept der kopfbasierten Kamera eine gewisse Eigenverantwortung des Kommissionierers vorausgesetzt. Eine mutwillige Fehlbedienung kann auch durch dieses System nicht ausgeschlossen werden.

Im Vergleich zum Scannen von Barcodes mit einem Handscanner ist der Handhabungsaufwand mit der kopfbasierten Kamera niedriger einzuschätzen, weil sich die Kamera stets in Blickrichtung mit dem Kopf des Kommissionierers bewegt und der Kommissionierer beide Hände frei für die eigentliche Kommissionieraufgabe hat. Dennoch ist davon auszugehen, dass gegenüber einem Pick-by-Vision System ohne Fehlerüberprüfung eine Verlangsamung des Kommissionierprozesses auftritt. Um dies zu verringern, kann es sinnvoll sein, anstatt jeder einzelnen Entnahmeeinheit nur die erste Entnahmeeinheit einer Position zu überprüfen und die weiteren Entnahmen eigenverantwortlich durchzuführen. Zur Durchführung der Mengenkontrolle ist auch eine Kombination beispielsweise mit dem Konzept 2: „Waage auf Kommissionierwagen“ denkbar.

5.5 Konzeptauswahl

Aus den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Konzepten erfolgt die Auswahl eines geeigneten Konzeptes zur Umsetzung als Demonstrator. Tabelle 5-2 enthält eine Übersicht der sieben vorausgewählten Konzepte sowie eine Beschreibung der jeweils in der Bewertung berücksichtigten Variante.

Tabelle 5-2: Übersicht vorausgewählter Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung

| | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Konzept 1 | Der Lichtvorhang vor dem Regal wird mittels eines Laserscanners realisiert, der mehrere Regalfelder überwachen kann. Zur Kontrolle der Ablage sind auf dem Kommissionierwagen Lichtschranken über den einzelnen Sammelbehältern angebracht. |
| Konzept 2 | Auf dem Kommissionierwagen sind mehrere Waagen angebracht. Auf jede Waage kann ein Sammelbehälter gestellt werden. |
| Konzept 3 | Für den Einsatz des RFID-Handschuhs wird davon ausgegangen, dass Transponder an den Bereitstellenheiten und den Sammelbehältern angebracht sind. Somit kann lediglich der Griff in das richtige Lagerfach und die Ablage in den richtigen Sammelbehälter überwacht werden. Die Variante, Transponder an jedem Artikel anzubringen, würde zwar eine bessere Überprüfbarkeit gewährleisten, ist aber derzeit aufgrund der hohen Kosten nur in Ausnahmefällen üblich, und wird deshalb nicht weiter betrachtet. |
| Konzept 4 | Aufgrund der hohen Kosten für die Kennzeichnung einzelner Artikel mit RFID-Transpondern wird als Identensystem am Kommissionierwagen ein optisches System basierend auf einer Videokamera gewählt. |
| Konzept 5 | Mehrere IR-Kameras, die ortsfest im Lager angebracht sind, erfassen die Position und Ausrichtung sowohl der Hand des Kommissionierers als auch des Wagens mittels geeigneter Targets. Durch die bekannte Geometrie des Wagens und des Sammelbehälters ist auch die Überprüfung der Ablage in den richtigen Sammelbehälter möglich. Dieses Konzept ermöglicht durch ein weiteres Target auch das Tracken des Kopfes zur perspektivisch richtigen Einblendung virtueller 3D-Informationen. |

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Konzept 6 | IR-Kameras am Kommissionierwagen erfassen Targets am Handgelenk und am Kopf des Kommissionierers sowie an den Regalen. Analog zum Konzept 5 kann der Greifvorgang in das richtige Entnahmefach und die Ablage in den richtigen Sammelbehälter überprüft werden. Das Tracken des Kopfes ermöglicht die perspektivisch richtige Einblendung virtueller 3D-Informationen. |
| Konzept 7 | Eine am Kopf befestigte Kamera erkennt sowohl optische Codierungen an den Artikeln als auch an den Regalen angebrachte Marker, und ermöglicht somit neben der Überprüfung von Artikeln auch die perspektivisch richtige Einblendung von virtuellen Informationen. |

Die Bewertung der Konzepte wird für jedes der drei in Abschnitt 4.1 entwickelten Einsatzszenarien hinsichtlich der folgenden Kriterien durchgeführt:

- Fehlererkennung bei der Entnahme
- Fehlererkennung bei der Ablage
- Kommissionierleistung
- Kosten
- Ergonomie
- Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen
- Flexibilität
- Eignung für mehrere Kommissionierer
- Unterstützung der optischen Wegfindung
- Arbeitssicherheit

Die genannten Kriterien werden zunächst durch einen paarweisen Vergleich gewichtet. Anschließend erfolgt die Auswahl eines geeigneten Konzeptes für das jeweilige Szenario mittels einer Nutzwertanalyse. Die Bewertung erfolgt anhand einer Skala von null bis zehn Punkten, wobei die Punktzahl zehn den größten Teilnutzen repräsentiert. Die ausführliche Bewertung ist dem Anhang A des vorliegenden Berichts zu entnehmen. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind in Tabelle 5-3 zusammengefasst.

Die erzielten Nutzwerte liegen im Bereich von 5,83 bis 7,68 Punkten. Ausgehend von einem maximal erreichbaren Nutzwert von zehn Punkten bedeutet dies, dass kein

ideales Konzept existiert, das in einem oder mehreren Szenarien einsetzbar ist. Während Konzept 2 durch den Einsatz der Wägetechnik im Szenario 1 seine Vorteile zeigt, ist Konzept 7 in den Szenarien 2 und 3 die beste Lösung, u. a. auch deshalb, weil es im Gegensatz zu Konzept 2 die optische Wegführung durch ein Trackingsystem unterstützt. Weiterhin ist festzustellen, dass nahezu mit keinem Konzept Zustandsfehler identifiziert werden können. Lediglich beim Konzept 7 fallen unlesbare optische Codierungen auf, wenn das System nicht reagiert. Weitere Zustandsfehler können nicht automatisch erkannt werden. Ein Nachteil des Konzeptes 7 besteht darin, dass beim Multi-Order-Picking die Ablage in einen falschen Sammelbehälter nicht erkannt wird. Weiterhin ist zu beachten, dass die Konzepte 4 und 7 zwar hinsichtlich des Szenarios 1 insgesamt mit einem mittleren Nutzwert bewertet werden, jedoch keine einzige Fehlerart erkennen können.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse zur Auswahl geeigneter Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung

| | Konzept 1 | Konzept 2 | Konzept 3 | Konzept 4 | Konzept 5 | Konzept 6 | Konzept 7 |
|------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Szenario 1 | 6,29 | 7,45 | 6,39 | 6,20 | 6,37 | 5,87 | 6,72 |
| Szenario 2 | 6,20 | 7,38 | 6,39 | 7,18 | 6,37 | 5,87 | 7,68 |
| Szenario 3 | 6,11 | 7,34 | 6,39 | 7,18 | 6,23 | 5,83 | 7,57 |

Eine ideale Lösung für den Einsatz in allen drei Szenarien bestünde in der Kombination mehrerer Konzepte. So könnten beispielsweise die Konzepte 2 und 7 kombiniert werden, um sowohl auf ein preiswertes Trackingsystem zurückgreifen zu können, als auch die sichere automatisierte Identifikation eines möglichst großen Artikelspektrums und die Überprüfung der Ablage in den richtigen Sammelbehälter zu ermöglichen. Allerdings erhöhen sich bei einem solchen Konzept auch die Komplexität und die Kosten sowie die Anforderungen an die Qualität und die Vollständigkeit der im WMS hinterlegten Daten. Für ein bestimmtes reales Kommissioniersystem ist also für den Einzelfall zu bewerten, welches Konzept bzw. welche Kombination von Konzepten den besten Nutzen im Verhältnis zum Aufwand bietet.

Das Interesse der Mitglieder des PA gilt insbesondere den Szenarien 2 und 3. Deshalb wird im weiteren Projektverlauf – auch aufgrund der sehr niedrigen Investitionskosten in einem großen Kommissionierlager – ausschließlich das Konzept 7 weiterverfolgt.

6 Realisierung des Demonstrators

Das Konzept der kopfbasierten Kamera wird als Demonstrator realisiert und anschließend bezüglich der Einsatzfähigkeit evaluiert. Im Folgenden werden die ausgewählten Hard- und Softwarekomponenten sowie die einzelnen Funktionen des Demonstrators aus Sicht des Nutzers dargestellt.

6.1 Komponenten des Systems

6.1.1 Übersicht

Als AR-System enthält der Demonstrator des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems die typischen Komponenten eines AR-Systems, die in Abschnitt 2.1.2 dargestellt sind. Als Visualisierungsmedium kommt ein HMD mit eingebauter Kamera zum Einsatz. Die Kamera übernimmt neben der Erfassung von Papiermarkern an den Regalen nicht nur Funktionen des Trackingsystems sondern dient auch der Überprüfung von optischen 2D-Codes an den Artikeln. Als weiteres Interaktionsgerät neben der Kamera wird ein Dreh-Drückknopf verwendet, mit dem der Benutzer die Prozessführung beeinflussen und Eingaben tätigen kann. Der Dreh-Drückknopf wird am Gürtel befestigt. Zur Datenverarbeitung kommt ein Wearable PC (Personal Computer) zum Einsatz, der in einer Weste am Körper getragen wird. Abbildung 6-1 veranschaulicht die verwendeten Komponenten.



Abbildung 6-1: Komponenten des Demonstrators

Für die Umsetzung des Konzeptes der kopfbasierenden Kamera als Demonstrator werden überwiegend am Markt verfügbare Komponenten verwendet. Eine Ausnahme ist die AR-Software, die zwar auf kommerzielle Komponenten, z. B. für die Bildererkennung, zurückgreift, aber speziell für den Anwendungsfall der AR-unterstützten Kommissionierung entwickelt wird.

Die verwendete Hard- und Software sowie wichtige technische Daten werden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Insbesondere wird jeweils das Gewicht der einzelnen Komponenten angegeben, weil im Rahmen von Probandenversuchen (vgl. Kapitel 7) eine subjektive Bewertung des Systems erfolgen soll, und dabei von einem Zusammenhang zwischen dem Gewicht und der Beurteilung durch die Probanden ausgegangen wird.

6.1.2 Visualisierungsmedium

Als Visualisierungsmedium dient ein monokulares Optical-See-Through Display. Bei dieser Bauart wird das virtuelle Bild auf einen halbtransparenten Spiegel vor dem Auge des Nutzers projiziert.

Für den Demonstrator wird das in Abbildung 6-2 gezeigte Modell M3 Cam der Trivision Prototyping GmbH verwendet. Durch den halbtransparenten weitestgehend rahmenlosen Spiegel wird die Sicht auf die Umgebung kaum eingeschränkt. Durch die Möglichkeit der Farbdarstellung mit einer Farbtiefe von 24 bit [Tri-2011] können beispielsweise kritische Systemzustände durch die Verwendung einer entsprechenden Farbe visuell hervorgehoben werden. Das Display besitzt eine Auflösung von 800 x 600 Pixel bei einem diagonalen Field-of-View von 29°. Die fest eingestellte Accomodation Distance von 1580 mm ermöglicht es dem Kommissionierer, z. B. in einer Lagergasse mit etwa der Breite der Accomodation Distance, gleichzeitig die virtuelle Information und die Realität scharf zu sehen, ohne umfokussieren zu müssen.

Über den optional erhältlichen Kopfhörer und das integrierte Audio-Modul können dem Kommissionierer zusätzlich zur visuellen Ausgabe auch akustische Signale eingespielt werden, beispielsweise als Rückmeldung auf eine Benutzereingabe.



Abbildung 6-2: Head-mounted Display des Demonstrators

Durch die im Gehäuse eingebaute CCD-Kamera dient das verwendete HMD im AR-System nicht nur als Visualisierungsmedium sondern auch als Interaktionsgerät (vgl. Abschnitt 6.1.4) und übernimmt zudem Funktionen des Trackingsystems (vgl. Abschnitt 6.2.4). Das Gewicht des HMDs beträgt inklusive der Kopf-Halterung, der Kamera und dem Headset ca. 570 g.

6.1.3 Mobiler Rechner

Als mobiler Rechner kommt der in Abbildung 6-3 gezeigte Wearable PC One der teXXmo Mobile Solution GmbH & Co. KG zum Einsatz, dessen technische Daten im Folgenden beschrieben sind. Die für den Demonstrator verwendete Software ist gesondert in Abschnitt 6.1.5 dargestellt.

Als Prozessor wird ein Intel Atom-Prozessor, der i. A. als sehr energieeffizient gilt [Bor-2008], mit einer Taktfrequenz von 1,6 GHz verwendet [tex-2011]. Der Wearable PC verfügt über einen Arbeitsspeicher von 2 GB. Als Speichermedien stehen eine Flash Disk mit 4 GB und eine Speicherkarte mit 15 GB zur Verfügung. Im Gegensatz zu konventionellen Festplatten sind bei dieser Art des Speichers keine beweglichen mechanischen Teile vorhanden. Dies ist insbesondere beim Einsatz unter industriellen Bedingungen vorteilhaft, da dort mit Stößen und Erschütterungen zu rechnen ist. In dem mobilen Rechner ist ein WLAN-Modul integriert, mit dem die kabellose Verbindung zu einem WMS-Server hergestellt werden kann. Die Anbindung des Systems an ein kommerzielles WMS ist jedoch nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes. Zum Anschluss des HMDs, sowie von Tracking- und Interaktionsgeräten stehen eine Grafikschnittstelle und mehrere USB 2.0 (Universal Serial Bus 2.0) Schnittstellen zur Verfügung. Alle Steckverbindungen sind als Industriestecker ausgeführt.

Diese erlauben nur dann eine Verbindung, wenn die Pins des Steckers richtig zur Buchse positioniert sind. Des Weiteren sind die Stecker mit einem Mechanismus versehen, der das versehentliche Herausziehen am Kabel verhindert.

Der Wearable PC wird in der in Abbildung 6-1 gezeigten Weste am Körper getragen. Neben einer Tasche für den mobilen Rechner besitzt die Weste auch Taschen für die Unterbringung von weiteren Komponenten und Zubehör. Schlaufen und Klettverschlussverbindungen ermöglichen die flexible Anpassung der Weste an den Körperbau des Kommissionierers und eine körpernahe Führung von Kabeln in der Weste, um die Gefahr des Hängenbleibens zu reduzieren.



Abbildung 6-3: Mobiler Rechner des Demonstrators (Bildquelle: teXXmo Mobile Solution GmbH & Co. KG)

Der Lithium-Ionen-Akku mit einer Kapazität von 2400 mAh ermöglicht mit der in Abschnitt 6.1.5 beschriebenen Software und aktiviertem WLAN-Modul eine Laufzeit von ca. 2,5 bis 3 Stunden. Da mit den verwendeten Akkus auf jeden Fall während einer 8-Stunden-Schicht ein Akkuwechsel erforderlich ist, ist ein geringer Zeitbedarf für einen Akkuwechsel von besonderer Bedeutung. Um einen raschen Akkuwechsel zu gewährleisten, ist der Akku nicht im Rechner sondern in einer separaten Akkuhalterung in einer der vorderen Taschen der Weste untergebracht, und somit einfach zu greifen. Durch eine im Gehäuse des Rechners eingebaute Puffer-Batterie kann der Akku im laufenden Betrieb ausgetauscht werden, ohne dass der Rechner hierfür heruntergefahren werden muss.

Das Gesamtgewicht der am Körper zu tragenden Komponenten des mobilen Rechners beträgt ca. 1,5 kg. Die Gewichte der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 6-1: Gewicht der Komponenten des Wearable PCs

| Komponente | Gewicht |
|---------------|---------|
| Wearable PC | 620 g |
| Akku | 180 g |
| Akkuhalterung | 120 g |
| Weste | 570 g |
| Gesamt | 1.490 g |

6.1.4 Interaktionsgeräte

Durch Interaktionsgeräte erhält der Nutzer die Möglichkeit, eigenständig in die Steuerung des Systems einzugreifen. Hierfür stehen ihm eine im HMD integrierte Kamera und ein Dreh-Drückknopf als Interaktionsgeräte zur Verfügung.

Die Kamera dient nicht nur der reinen Identifikation von optischen Codes an den Artikeln oder an den Lagerfächern, sondern ermöglicht auch die Interaktion zwischen Nutzer und AR-System. So kann durch das automatische Erfassen und Überprüfen von Codes ohne einen zusätzlichen Handhabungsschritt des Kommissionierers ein Prozessschritt im System quittiert werden und die Ausgabe der Informationen für den folgenden Arbeitsschritt erfolgen. Der CCD-Sensor der Kamera besitzt eine Auflösung von 1600 x 1200 Pixel [Tri-2011]. Durch die sog. Autofokus-Funktion [Tri-2011] liefert die Kamera unabhängig vom genauen Abstand zwischen Kamera und dem zu erfassenden Objekt ein scharfes Bild.

Um Interaktionen ausführen zu können, die über eine reine Überprüfung bzw. Quittierung hinausgehen, wird als weiteres Interaktionsgerät ein Dreh-Drückknopf gewählt, der am Gürtel des Kommissionierers getragen wird. Es wird der in Abbildung 6-4 gezeigte SpaceNavigator for Notebooks des Herstellers 3Dconnexion verwendet. Es handelt sich dabei um eine Computermaus mit sechs Freiheitsgraden [3DC-2011]. Da unnötige Handgriffe zur Steuerung einerseits keine Wertschöpfung innerhalb der Arbeitsaufgabe darstellen und andererseits die Nutzerakzeptanz des

Systems gefährden, ist bei der Gestaltung der Interaktion auf eine geringe Anzahl notwendiger Eingaben in das System zu achten [Gün-2011c]. Durch eine niedrige Zahl an Eingabemöglichkeiten wird hingegen eine vereinfachte Eingabe unterstützt und die Wahrscheinlichkeit von Fehleingaben verringert [Gün-2011c]. Deshalb werden im Hinblick auf eine eindeutige Interaktion und eine geringe Anzahl unterschiedlicher Interaktionsschritte nur die Freiheitsgrade Drehen (links/rechts) und Drücken verwendet.



Abbildung 6-4: Dreh-Drückknopf zur Interaktion mit dem Demonstrator

Der Benutzer navigiert durch Drehen durch Menüs oder Listen, die ihm im HMD angezeigt werden. Durch Drücken kann die Auswahl eines Menüeintrages bzw. das Bestätigen eines Arbeitsschrittes des Kommissionierprozesses durchgeführt werden. Weitere Interaktionen, beispielsweise die Eingabe von Buchstaben oder Zahlen, lassen sich gegebenenfalls über eine Zeichenliste realisieren. Prinzipiell sind solche Interaktionen aber zu vermeiden, da diese einen zusätzlichen Zeitaufwand verursachen. Der Dreh-Drückknopf hat inklusive der Gürtelhalterung ein Gewicht von 330 g.

6.1.5 Software

Die Software bildet die Basis für jedes AR System und ist für AR-Anwendungen, die auf spezielle Einsatzfälle zugeschnitten sind, essenziell [Jel-2012]. Die Software ermöglicht, dass die einzelnen Systemkomponenten miteinander interagieren und kommunizieren können. Unter anderem müssen die folgenden zentralen Anforderungen durch die AR-Software erfüllt werden [Jel-2012]:

- Verarbeitung von Trackingdaten
- Definition und Ausführen von Workflows (eigentliche Anwendungslogik)
- Schnittstellen zum Anwender

- Renderingfunktionalität
- Gerätemangement (Einbinden verschiedener Ein- und Ausgabegeräte)
- Kommunikation zwischen den Systemkomponenten

Um diese Anforderungen zu realisieren, wurde für den Demonstrator unter Verwendung der Entwicklungsumgebung Visual Studio 2010 Ultimate der Firma Microsoft eine Software auf Basis der Hochsprache C#.NET und des .NET Frameworks 3.5 entwickelt. Die einzelnen Funktionen der Software, insbesondere der Workflow des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems, werden in Kap. 6.2 beschrieben.

Für Bildverarbeitungs- und Trackingfunktionen wird auf die kommerzielle AR-Software Unifeye SDK Professional Edition 3.5 der metaio GmbH zurückgegriffen. Weiterhin wird ein speziell angepasster Treiber für die Verarbeitung der Eingaben des Dreh-Drückknopfes verwendet.

Die wichtigsten Funktionen eines WMS, beispielsweise die Bestandsverwaltung oder die Verwaltung von Auftragsdaten, werden durch lokal auf dem Wearable PC verfügbare XML-Dateien (Extensible Markup Language Dateien) nachgebildet. Dies ermöglicht einen Test des Demonstrators unabhängig von einem bestimmten WMS eines Herstellers. Auch für die Verwaltung von benutzerspezifischen Einstellungen, wie z. B. das ausgewählte Farbschema oder die Sprache, werden XML-Dateien verwendet.

6.2 Funktionen des Demonstrators

Im Folgenden soll die Arbeit mit dem System aus der Sicht des Nutzers veranschaulicht werden. Hierzu werden ausgehend von einer Erläuterung des Interaktionskonzeptes wichtige Funktionen des Demonstrators dargestellt.

6.2.1 Interaktionskonzept

Das Interaktionskonzept basiert weitestgehend auf der schrittweisen Anzeige von Anweisungen für die einzelnen Arbeitsschritte des Kommissionierprozesses und Menüs, in denen die einzelnen Funktionen ausgewählt werden können. Durch die Kamera und den Dreh-Drückknopf erhält der Nutzer die Möglichkeit, durch Menüs zu navigieren und den Prozessablauf zu beeinflussen, indem er beispielsweise ab-

geschlossene Prozessschritte quittiert. Die wesentlichen Schritte des Interaktionskonzeptes sind in Abbildung 6-5 dargestellt.

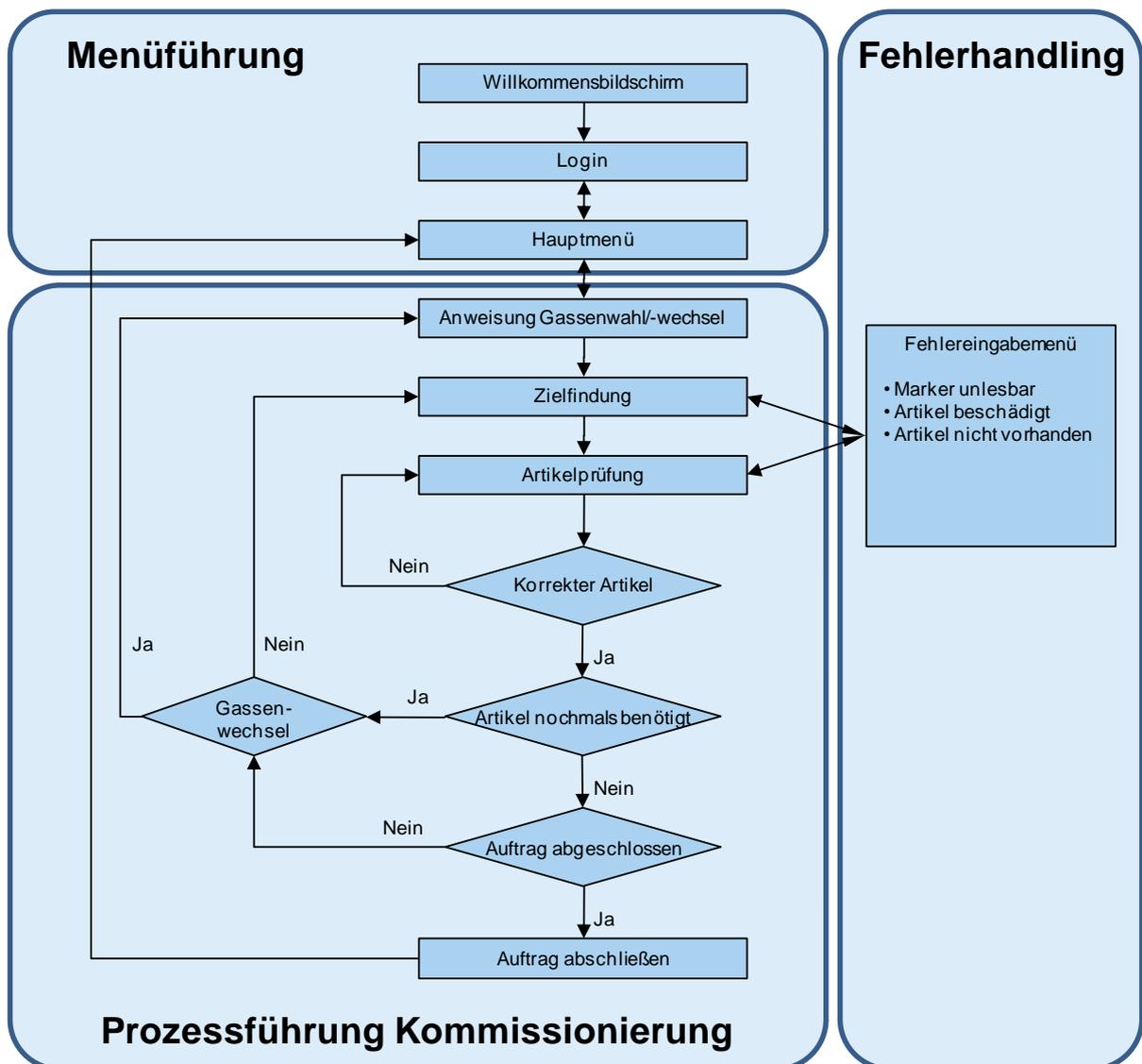


Abbildung 6-5: Interaktionskonzept des Demonstrators (in Anlehnung an [fml-2011b])

Die Funktionen des Systems können den drei folgenden Bereichen zugeordnet werden:

- Menüführung
- Prozessführung Kommissionierung
- Fehlerhandling

Unmittelbar nach dem Start des Systems wird dem Benutzer ein Willkommensbildschirm angezeigt. Nach erfolgreicher Anmeldung (Login-Vorgang), steht ihm ein Auswahlménü zur Verfügung. Hier kann u. a. ein Kommissioniervorgang gestartet

oder ein Menü für die Konfiguration des Systems aufgerufen werden. Die bisher genannten Schritte sind noch nicht Bestandteil des eigentlichen Kommissioniervorgangs, sondern dienen lediglich dessen Vorbereitung. Sie werden deshalb als Funktionsbereich **Menüführung** zusammengefasst, der in Abschnitt 6.2.5 ausführlicher beschrieben ist.

Startet der Kommissionierer im Hauptmenü die **Prozessführung Kommissionierung**, wird ein neuer Auftrag aus dem WMS angefordert und entsprechend Abschnitt 6.2.2 abgearbeitet. Dabei wird von einem idealisierten Prozess ausgegangen, bei dem keine Fehler auftreten.

Allerdings ist nicht auszuschließen, dass beispielsweise aufgrund fehlender Artikel oder beschädigter optischer Codes, der Kommissioniervorgang nicht fortgesetzt werden kann. Eine wesentliche Anforderung ist jedoch, dem Benutzer in jeder Situation eine geeignete Handlungsoption anzubieten. Hierfür steht ein Menü zur Verfügung, das den Funktionsbereich **Fehlerhandling** umfasst. Wie in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, bietet das Menü verschiedene Eingabemöglichkeiten, um den jeweiligen Fehlerfall im WMS zu vermerken und das Fortsetzen des Kommissioniervorgangs zu ermöglichen.

6.2.2 Kontextbezogene Anzeige der Prozessinformationen

Ein wesentlicher Bestandteil des Interaktionskonzeptes ist die schrittweise Führung des Benutzers durch den Kommissionierprozess. Hierfür werden für jeden Prozessschritt in Abhängigkeit vom Kontext die relevanten Informationen angezeigt. Die Anzeige der Prozessschritte und der Aufbau der grafischen Benutzeroberfläche orientiert sich an den Empfehlungen von [Gün-2009].

Ein Kommissioniervorgang beginnt mit dem Anfordern eines neuen Auftrags im Hauptmenü. Es folgt die Aufforderung, einen leeren Sammelbehälter aufzunehmen und dessen Aufnahme zu bestätigen. Nach Bestätigung dieses Schrittes mittels Dreh-Drückknopf erfolgt die visuelle Unterstützung der Wegfindung zum Entnahmepunkt der ersten Position, indem in zwei Schritten zunächst die Lagergasse und anschließend das Lagerfach angezeigt wird. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Wegfindung folgt in Abschnitt 6.2.4. Neben den für den Pickvorgang notwendigen Informationen Lagerfach und Stückzahl, können weitere Informationen, wie z. B. der Artikelname oder Verpackungshinweise eingeblendet werden. Abbil-

Abbildung 6-6 zeigt ein Beispiel, das dem Benutzer die Bezeichnung des Lagerfachs (links oben), die Stückzahl (rechts oben) und als zusätzliche Informationen die Produktbezeichnung in Textform angezeigt. Zusätzlich ist ein aus mehreren Kreisen bestehender Tunnel zu sehen, der der Wegfindung zum Entnahmefach dient.

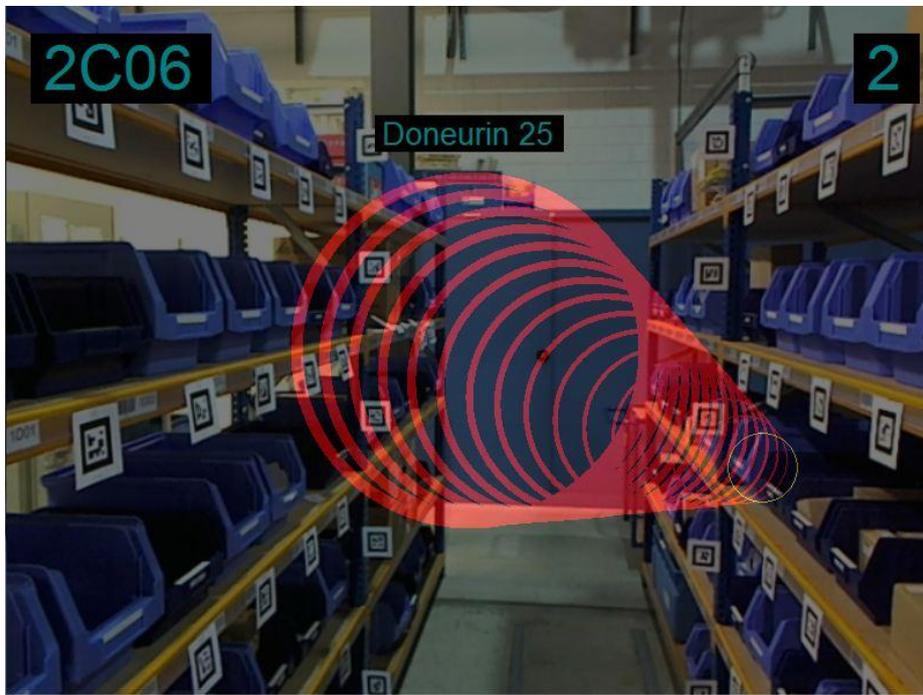


Abbildung 6-6: Lagernavigation innerhalb einer Gasse [fml-2011b]

Nach jeder Entnahme erfolgt eine Fehlerüberprüfung durch Lesung des Codes durch die im HMD integrierte Kamera und eine Rückmeldung an den Kommissionierer. Im Fehlerfall stehen verschiedene Eingabemöglichkeiten zur Verfügung, die dem in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen Funktionsbereich Fehlerüberprüfung und Fehlerhandling zuzuordnen sind. Dieser Vorgang wiederholt sich für alle Entnahmeeinheiten einer Position. Sind alle Positionen eines Auftrags abgearbeitet, erhält der Kommissionierer die Anweisung, an die Basis zurückzukehren und den Sammelbehälter abzugeben.

Für den Demonstrator wurde im Hinblick auf eine niedrige Fehlerquote eine Benutzerführung mit einer relativ hohen Anzahl an Interaktionsschritten gewählt. In Abhängigkeit von den Anforderungen an ein Kommissioniersystem können einzelne Schritte entfallen. Entscheidungskriterien hierfür sind beispielsweise die zu erreichende Fehlerquote bzw. Kommissionierleistung, oder ob das System von einem erfahrenen Mitarbeiter oder einem Mitarbeiter in der Einarbeitungsphase verwendet wird.

6.2.3 Fehlerüberprüfung und Fehlerhandling

Die zentrale Funktion des fehlersicheren Pick-by-Vision Systems ist die Fehlerüberprüfung. Wie in Abbildung 6-7 gezeigt, wird der Artikel so in das virtuelle Rechteck gehalten, dass der optische Code von der Kamera erfasst werden kann. In Abhängigkeit davon, ob der richtige Artikel entnommen wurde, erhält der Kommissionierer sowohl eine visuelle Rückmeldung im HMD als auch eine akustische Rückmeldung über ein am HMD befestigtes Headset.

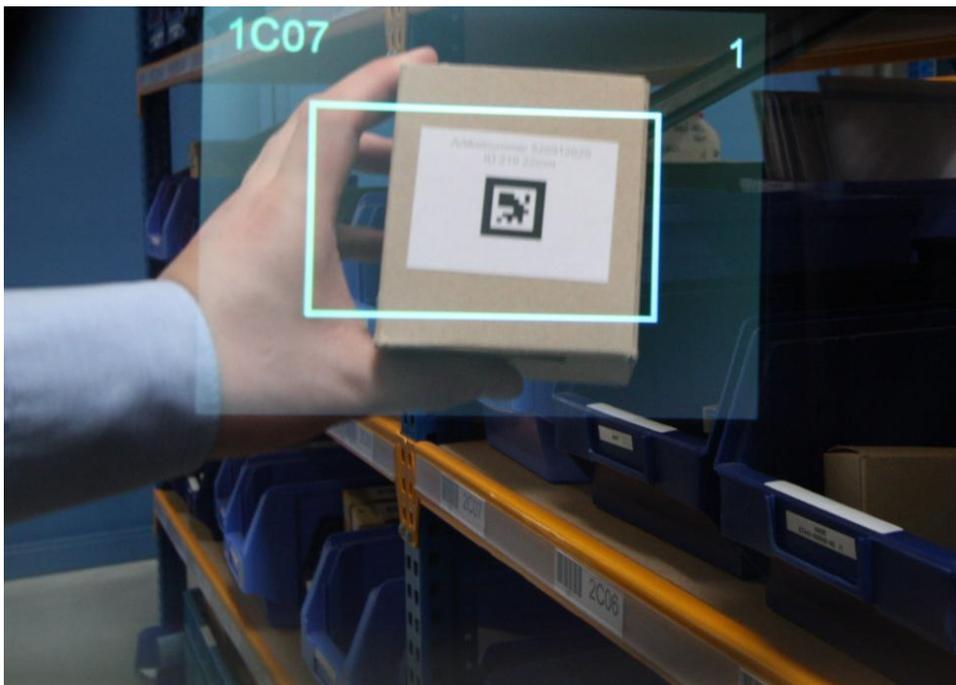


Abbildung 6-7: Fehlerüberprüfung aus der Perspektive des Kommissionierers

Für den Demonstrator des Forschungsprojektes wird als optische Codierung ein quadratischer 2D-Matrixcode mit einer Seitenlänge von 20 mm verwendet, der auf die Bildverarbeitungssoftware abgestimmt ist. Ein wesentlicher Vorteil von Matrixcodes gegenüber weit verbreiteten eindimensionalen Barcodes ist, dass diese eine robuste und sichere Erkennung durch die Bildverarbeitungssoftware ermöglichen.

Zusätzlich bietet ein Matrixcode die Möglichkeit, dessen Position relativ zur Kamera zu bestimmen. Dadurch ist es möglich, den durch die Kamera überwachten Raum einzugrenzen, um Fehllesungen zu verhindern. Abbildung 6-8 zeigt, dass das überwachte Volumen mit dem eingeblendeten Rahmen zusammenhängt. In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen kann der pyramidenförmige überwachte Raum durch Benutzereinstellungen eingegrenzt werden.

Eine weitere Maßnahme, die sowohl der Verhinderung von Fehllesungen, als auch der Ermittlung der entnommenen Stückzahl dient, ist die Erfassung jeder einzelnen Entnahmeeinheit. Da sich dies zwar positiv auf die Fehlerquote auswirkt, aber insbesondere bei Aufträgen mit einer hohen Entnahmemenge pro Position sehr zeitaufwendig ist, könnte alternativ auch nur die erste Entnahmeeinheit einer Position überprüft werden und weitere Entnahmen ohne eine Überprüfung durchgeführt werden.

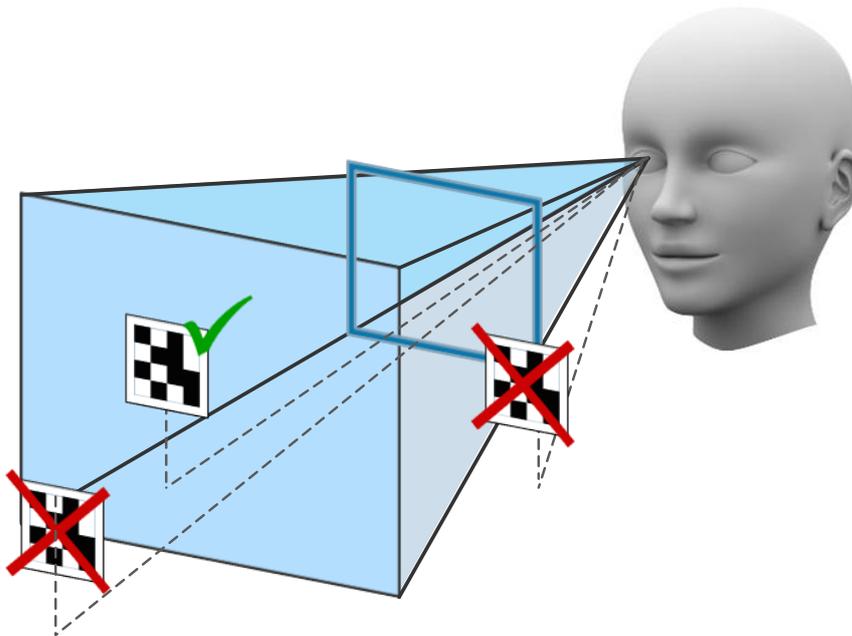


Abbildung 6-8: Eingrenzung des Raums zur Fehlerüberprüfung (in Anlehnung an [fml-2011b])

Der idealisierte Kommissioniervorgang entsprechend Abschnitt 6.2.2 basiert auf der Annahme, dass der Kommissionierer die Anweisungen des Systems Schritt für Schritt befolgt und stets der richtige Artikel im richtigen Zustand und der richtigen Menge vorhanden ist. Allerdings sind die Voraussetzungen für diesen idealisierten Ablauf nicht immer gegeben, beispielsweise wenn ein Artikel falsch eingelagert wurde oder der Matrixcode nicht lesbar ist. Für derartige Fälle existiert der Funktionsbereich des Fehlerhandlings. Ein entsprechendes Menü erlaubt die eigenverantwortliche Eingabe von Fehlern. Die Eingaben werden vom WMS verarbeitet und die Werkerführung so beeinflusst, dass das Fortsetzen des Kommissioniervorgangs wieder möglich ist. Folgende Fehlerfälle werden berücksichtigt:

- Zu wenige Artikel im Entnahmefach eingelagert
- Falsche Artikel im Entnahmefach eingelagert
- Zustandsfehler (z. B. ein beschädigter Artikel)

- Code eines Artikels unlesbar

Welche Maßnahmen im Fehlerfall getroffen werden, hängen von den konkreten Anforderungen an ein Kommissioniersystem ab. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird davon ausgegangen, dass der Kommissionierer auftretende Fehler nicht selbst behebt, sondern diese lediglich weitermeldet, so dass durch eine im WMS hinterlegte Strategie oder die Entscheidung eines Mitarbeiters, z. B. des Schichtleiters oder eines Sachbearbeiters im Einkauf, weitere Maßnahmen angestoßen werden können.

Während im Fall von zu wenigen oder falsch eingelagerten Artikeln im Entnahmefach eine Meldung nach einem definierten einheitlichen Schema an den WMS-Server übertragen werden kann, treten Zustandsfehler in vielfältigen Formen auf. In diesem Fall wird die im HMD integrierte Kamera verwendet, um den Zustand des Artikels zu dokumentieren, denn ein in Echtzeit übertragenes Foto erspart eine aufwendige und missverständliche verbale Beschreibung des Zustandsfehlers. Kann ein optischer Code beispielsweise aufgrund von Verschmutzungen oder einem beschädigten Etikett nicht von der Kamera gelesen werden, so erhält der Kommissionierer die Möglichkeit, den Vergleich der Artikelnummer eigenverantwortlich durchzuführen. Er quittiert dann manuell, um im Prozess weiter fortzufahren.

6.2.4 Wegfindung

Die Wegfindung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt erhält der Kommissionierer zunächst die Information, in welcher Gasse sich das gesuchte Lagerfach befindet. Diese Information wird anhand der im WMS hinterlegten Daten und des Auftragsstatus ermittelt. Die Anzeige erfolgt kontextbezogen als Texteinblendung bei der ersten Position eines Auftrags bzw. immer dann, wenn ein Gassenwechsel erforderlich ist.

Nach der Quittierung des ersten Schrittes folgt mit der Anzeige des Entnahmefachs der aktuellen Position der zweite Schritt der Wegfindung. Neben der Lagerfachbezeichnung als Textinformation kann zur visuellen Unterstützung ein sich dynamisch anpassender Tunnel eingeblendet werden.

Die Gestaltung der Tunnelvisualisierung basiert auf den Arbeiten von Schwerdtfeger [Scw-2009] und Reif [Rei-2009]. Der Tunnel besteht, wie in Abbildung 6-6 (Seite 103) gezeigt, aus mehreren Kreisen. Dabei ist der letzte Kreis in einer anderen Farbe dargestellt, so dass das Ende des Tunnels einfach zu erkennen ist. Der erste Kreis ist

immer mindestens teilweise sichtbar. Dies ermöglicht auch das intuitive Auffinden eines Lagerfachs, das sich nicht im Sichtfeld des Benutzers befindet. Um zum entsprechenden Lagerfach zu gelangen, muss sich der Kommissionierer so drehen, dass sich der angezeigte Kreisbogen zum Kreis vervollständigt.

Für die dynamische Tunnelvisualisierung wird auf das Trackingsystem zurückgegriffen. Softwareseitig besteht das Trackingsystem aus dem Unifeye SDK der Firma metaio in der Version 3.5 und dem Tracking-Modul der AR-Software. Außerdem ist es erforderlich, die im HMD integrierte Kamera zu kalibrieren und das Lager entsprechend Abbildung 6-6 (Seite 103) mit Papiermarkern auszustatten. In der Versuchsumgebung der Forschungsstelle werden Marker mit einer Seitenlänge von 60 mm in einem Abstand von 300 mm in horizontaler und 400 mm in vertikaler Richtung an der Regalfront angebracht. Zusätzlich befinden sich senkrecht dazu weitere Marker in einem vertikalen Abstand von 400 mm an den Stehern des Regals. Dadurch befindet sich nahezu immer mindestens ein Marker im Erfassungsbereich der Kamera.

Nachteilig an der dynamischen Wegfindung mittels Tunnelvisualisierung ist, dass diese nicht immer flüssig angezeigt wird. Ein Funktionstest hat gezeigt, dass mit der für den Demonstrator verwendeten Hard- und Software insbesondere bei schnellen Bewegungen Aussetzer der Visualisierung und eine deutlich spürbare Latenzzeit beim Aufbau des Tunnels in Kauf genommen werden müssen. Deshalb wird die Funktion der Tunnelvisualisierung im Rahmen des Projektes nicht weiterverfolgt, und die Benutzerführung so angepasst, dass das Trackingsystem abgeschaltet werden kann.

6.2.5 Sonstige Funktionen

Die sonstigen Funktionen stehen nicht direkt im Zusammenhang mit der eigentlichen Kommissionierung, sondern sind der Vorbereitung zuzuordnen oder ermöglichen die visuelle Unterstützung weiterer Tätigkeiten der operativen Logistik neben der Kommissionierung.

Nach dem Start des Systems ist es erforderlich, dass sich der Kommissionierer am System anmeldet. Dadurch ist es möglich, individuelle Einstellungen, wie z. B. die Anzeige oder die Sprache zu berücksichtigen. Außerdem ist die Anmeldung am System die Basis für eine automatische Dokumentation, um beispielsweise nachzuvollziehen, wer einen bestimmten Auftrag bearbeitet hat. Für den Login-Vorgang stehen

zwei Varianten zur Verfügung. Neben der Auswahl des Namens aus einer Liste kann auch ein Mitarbeiterausweis mit einer optischen Codierung zur Anmeldung am System verwendet werden. Der Mitarbeiterausweis wird zur Erfassung ähnlich wie ein Artikel für die Fehlerüberprüfung in die Kamera gehalten. Dieses Vorgehen ermöglicht eine einfache und schnelle Identifizierung sowie den Schutz vor unbefugter Benutzung.

Das Hauptmenü stellt neben dem Anfordern eines neuen Kommissionierauftrags noch einige weitere Funktionen zur Verfügung. So wird beispielsweise ein Konfigurationsmenü zur Verfügung gestellt, in dem individuelle Einstellungen durch den Benutzer festgelegt werden können. Aus den Daten für einen Kommissionierauftrag, die im WMS unabhängig von einer bestimmten Sprache vorliegen, können durch das Pick-by-Vision System Anweisungen in einer vom Nutzer auswählbaren Sprache generiert und ausgegeben werden.

Es ist davon auszugehen, dass persönliche Vorlieben des Kommissionierers oder häufig im Lager vorkommende Farbtöne Einfluss darauf haben, welche Farben für die Darstellung im HMD bevorzugt werden. Die Überprüfung dieses Sachverhalts zur kontinuierlichen Verbesserung von Pick-by-Vision Systemen ist auch Bestandteil der Probandenversuche im Rahmen dieses Forschungsprojektes (vgl. Kapitel 7). Deshalb wird eine Möglichkeit vorgesehen, um neben der Sprache auch ein individuelles Farbschema festlegen zu können.

Prinzipiell ist es denkbar, mit dem System auch andere Tätigkeiten der operativen Logistik durch die kontextbezogene Einblendung von Informationen zu unterstützen. So kann das System beispielsweise auch für das Einlagern, Verpacken oder für die Inventur verwendet werden. Entsprechende Funktionen sind im Demonstrator vorgesehen, wurden aber nicht ausgearbeitet, da der Betrachtungsgegenstand des Forschungsprojektes die Kommissionierung ist.

7 Evaluierung des Demonstrators

Zur Evaluierung der Einsatzfähigkeit des im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelten fehlersicheren Pick-by-Vision Systems, werden Probandenversuche mit dem Demonstrator durchgeführt. Im Fokus der Versuchsreihen steht die Analyse der Kommissionierfehler sowie der Kommissionierzeit. Um zudem das Potenzial des zusätzlichen Mechanismus der Fehlervermeidung zu berücksichtigen, werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ in die Betrachtungen miteinbezogen. Auf diese Weise können verschiedene AR-basierte Kommissioniersysteme miteinander verglichen werden. Zusätzlich zu den logistischen Kennzahlen werden auch subjektive Kriterien in Form von Fragebögen in die Bewertung miteinbezogen. Die Evaluierung des Systems erfolgt sowohl in Labortests als auch in Praxistests mit Kommissionierern aus zwei Unternehmen des PA.

7.1 Evaluierung im Labortest

7.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Das Ziel des Labortests ist die Untersuchung des Potenzials der Fehlervermeidung in der manuellen Kommissionierung durch den Einsatz eines fehlersicheren Pick-by-Vision Systems. Dazu werden die logistischen Kennzahlen, die bei der Kommissionierung mit dem Demonstrator erzielt werden, mit weiteren Systemen verglichen.

Insgesamt werden die drei folgenden Kommissioniertechniken berücksichtigt:

- Pick-by-Vision II (PbVi II)
- Kommissionierliste (Liste)
- Pick-by-Vision mit Barcodescanner (PbVi Barcode)

Dabei entspricht das System **Pick-by-Vision II** dem in Kapitel 6 beschriebenen Demonstrator. Die **Kommissionierliste** kann aufgrund ihrer hohen Verbreitung als Referenz angesehen werden. Für die Versuche wird eine nach den in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Gestaltungsrichtlinien entworfene Kommissionierliste verwendet (vgl. Anhang B). Die einzelnen Daten einer Auftragszeile wurden klar voneinander getrennt und die wichtigen Informationen optisch hervorgehoben. Am Ende jeder Zeile befindet sich ein Kästchen, in dem ein Haken für die Quittierung gesetzt werden

kann. Jeder Auftrag enthält am Ende eine Zeile, in der der Kommissionierer die abgeschlossene Bearbeitung des Auftrags mit dem Datum und seiner Unterschrift bestätigt. Das System **Pick-by-Vision mit Barcodescanner** entspricht dem System Pick-by-Vision II, jedoch mit dem Unterschied, dass zur Identifikation der Artikel statt der kopfbasierten Kamera ein Handscanner eingesetzt wird.

Versuchsumgebung (Lagereinrichtung und -inhalt)

Als Versuchsumgebung für den Labortest steht das in Abbildung 7-1 gezeigte Fachbodenregallager (A) mit 280 Lagerplätzen in der Versuchshalle der Forschungsstelle zur Verfügung. Als Basis (B), an welcher der Proband den Kommissioniervorgang beginnt, den Sammelbehälter (C) aufnimmt und auch wieder abgibt, dient ein Tisch, der ca. 4 m vor dem Lagerbereich aufgebaut ist. Entsprechend dem in Abschnitt 5.1 festgelegten Modellprozess werden die kommissionierten Artikel in einen Sammelbehälter abgelegt. Hierfür wird ein Kleinladungsträger (KLT) mit den Abmessungen 600 x 400 x 280 mm verwendet. Für den Transport des Sammelbehälters steht ein Kommissionierwagen (D) zur Verfügung, den die Probanden während der Kommissionierung mitführen müssen. Der Wagen wird stets in die Gasse mitgenommen.

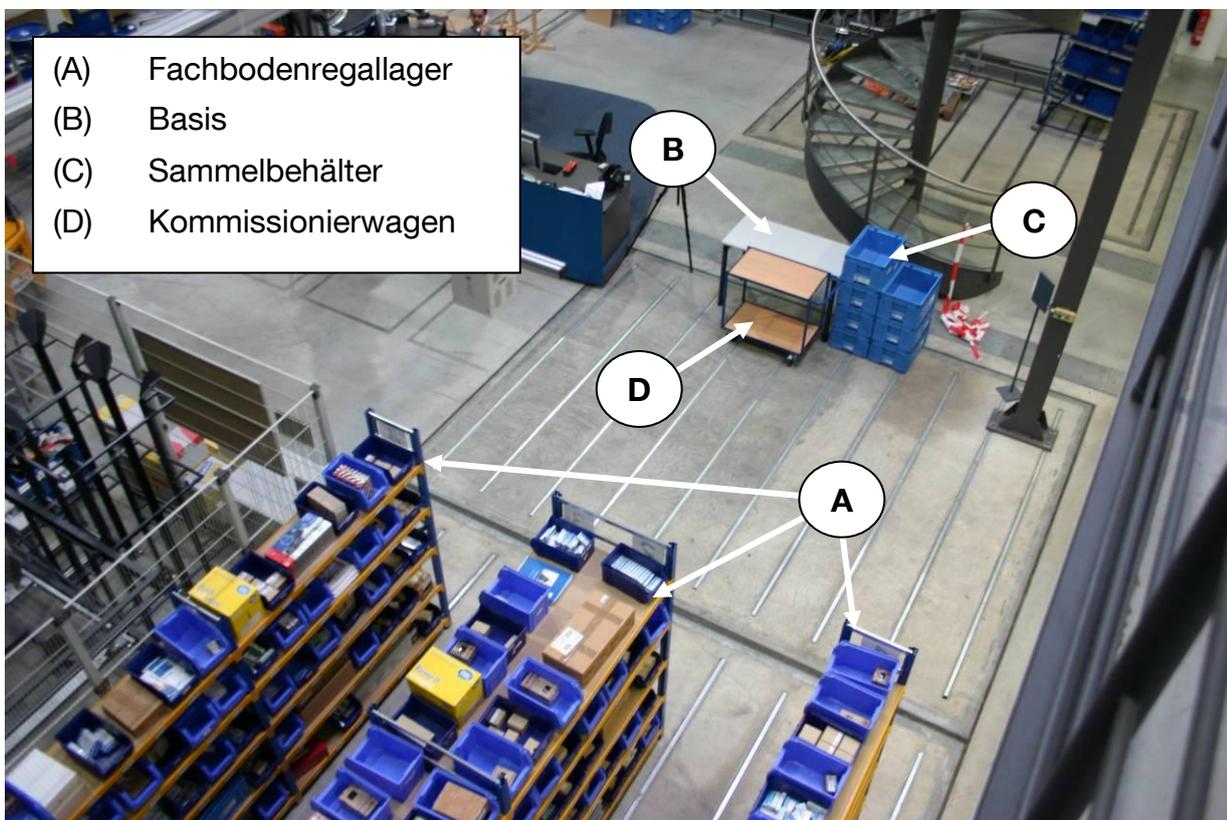


Abbildung 7-1: Versuchsumgebung für die Probandenversuche (in Anlehnung an [Gün-2009])

Die Lagereinrichtung und der Lagerinhalt wird entsprechend dem Einsatzszenario 2 (vgl. Abschnitt 4.1) gewählt, da die Ergebnisse einer Nutzwertanalyse (vgl. Abschnitt 5.5) hier einen großen Mehrwert durch den Einsatz eines fehlersicheren Pick-by-Vision Systems nach dem Prinzip der kopfbasierten Kamera erwarten lassen. Das Lager besteht, wie in Abbildung 7-1 zu erkennen, aus zwei Gassen. Die Länge einer Regalzeile beträgt 3.360 mm, die Tiefe eines Regals 400 mm und die Breite einer Gasse 1.000 mm. Das Regal enthält fünf Fachböden in einem vertikalen Abstand von 400 mm, von denen sich die höchste Regalebene aufgrund von ergonomischen Anforderungen auf einer Höhe von 1.730 mm befindet. Insgesamt stehen 280 Lagerplätze zur Verfügung, für deren Beschriftung in Anlehnung an [Gün-2009] abwechselnd Ziffern und Buchstaben für die einzelnen Elemente der Lagerplatzbezeichnung verwendet werden. Die Lagerplatzbezeichnung besteht der Reihenfolge nach aus einer Ziffer für die Regalzeile, einem Buchstaben für die Ebene und wiederum einer Ziffer für den Stellplatz. Als Lagerhilfsmittel werden für ein Kommissionierlager übliche Sichtlagerkästen mit einer Grundfläche von 210 x 330 mm und KLT mit den Abmessungen 600 x 400 x 280 mm verwendet. Größere Artikel werden teilweise auch ohne Lagerhilfsmittel eingelagert. Die KLT und einige Kartons sind breiter als ein Lagerplatz und belegen somit entsprechend ihrer Größe mehrere Lagerplätze. Der Lagerinhalt besteht aus kleinen und mittelgroßen Kartons, beispielsweise für Schrauben, Dübel, Medikamente oder Videorecorder sowie Broschüren und Flyern. Die Kartons sind teilweise leer, teilweise mit den entsprechenden Produkten gefüllt. Dabei wird berücksichtigt, dass auch große bzw. schwere Kartons, vorhanden sind, bei denen die Entnahme beidhändig erfolgen muss, um den Vorteil der freien Hände mit dem Pick-by-Vision II System aufzeigen zu können. Zur Kennzeichnung der Artikel wurden Etiketten auf den Artikeln aufgebracht. Diese enthalten jeweils eine eindeutige Artikelnummer, sowie einen Barcode und einen Matrixcode zur Identifizierung. Als Belegungsstrategie wird die chaotische Lagerhaltung gewählt. Mit 257 belegten Lagerplätzen beträgt der Lagerfüllungsgrad 91,8 %. Abweichend von der chaotischen Lagerung wird ein Artikel an einer definierten Stelle falsch eingelagert. Dieser Fehler ist von den Probanden zu erkennen und mittels des jeweils verwendeten Kommissioniersystems zu dokumentieren, beispielsweise handschriftlich auf der Kommissionierliste zu vermerken.

Versuchsablauf

Um einheitliche Bedingungen für alle Probanden zu schaffen, erfolgt die Durchführung einer Versuchsreihe anhand eines vorgegebenen Ablaufs. Zu Beginn des Versuchs erhalten die Probanden eine Einweisung in die Thematik. Dabei wird neben dem Aufbau des Lagers auch die Gestaltung der Kommissionierliste und die Funktionalität der Pick-by-Vision Systeme erläutert. Ergänzt wird die Einweisung durch einen Probedurchlauf vor der eigentlichen Versuchsreihe, bei dem ein exemplarischer Auftrag zur Übung des Umgangs mit dem jeweiligen Systemen bearbeitet wird. Im Anschluss daran startete die eigentliche Durchführung der drei Versuchsreihen. Jeder Proband absolviert jeweils einen Versuchslauf mit der Kommissionierliste sowie den beiden Systemen Pick-by-Vision II und Pick-by-Vision Barcode. Jeder der sechs Aufträge einer Versuchsreihe wird in Anlehnung an den in Abbildung 2-3 (Seite 14) dargestellten Ablauf bearbeitet. Dabei sind die Besonderheiten des jeweiligen Systems zu berücksichtigen, die im Folgenden erläutert werden:

Während die Kommissionierer bei der Belegkommissionierung in der Praxis oft an der Basis auf den Ausdruck der Liste warten müssen, wird den Probandenversuchen ein idealisierter Prozess zugrunde gelegt, bei dem die Auftragslisten bereits ausgedruckt an der Basis vorliegen. Beim Kommissionieren mit der Liste sind die Probanden angehalten, jede Position der Liste abzuhaken. Die Fehlerüberprüfung ist eigenverantwortlich durchzuführen. Im Falle eines Fehlers, z. B. eines falsch eingelagerten Artikels, ist dieser handschriftlich auf der Kommissionierliste zu vermerken. Zum Abschluss des Kommissioniervorgangs bestätigt der Kommissionierer die Bearbeitung des Auftrags mit dem Datum und seiner Unterschrift und legt die Liste in den Behälter.

Auch beim System Pick-by-Vision II wird von einem idealisierten Prozess ausgegangen. Das Anlegen und Ablegen der Ausrüstung sowie der Austausch eines leeren Akkus wird nicht berücksichtigt. An der Basis ist nur einmalig beim ersten Auftrag ein Login-Vorgang mit einem Mitarbeiterausweis (vgl. Abschnitt 6.2.5) durchzuführen. Die Quittierung jedes Prozessschrittes erfolgt mittels Dreh-Drückknopf. Außerdem wird jede einzelne Entnahmeeinheit von der kopfbasierten Kamera überprüft. Für die Eingabe eines Fehlers steht das in Abschnitt 6.2.3 beschriebene Fehlermenü zur Verfügung, in dem der entsprechende Fehlerfall mittels Dreh-Drückknopf ausgewählt werden kann. Im Gegensatz zur Kommissionierliste, wird durch das System Pick-by-Vision II automatisch dokumentiert, welcher Kommissionierer zu welchem

Zeitpunkt einen Auftrag bearbeitet hat, so dass eine handschriftliche Quittierung des Auftrags entfallen kann.

Der Ablauf mit dem System Pick-by-Vision Barcode entspricht im Wesentlichen dem System Pick-by-Vision II. Statt der kopfbasierten Kamera kommt zur Fehlerüberprüfung ein Barcode-Handscanner zum Einsatz. Auch mit diesem wird jede einzelne Entnahmeeinheit durch Scannen überprüft. Um ein weiteres Konzept für die Interaktion im Fehlerfall in Verbindung mit einem Pick-by-Vision System zu testen, kommt hier nicht das Fehlermenü des Systems Pick-by-Vision II zum Einsatz. Stattdessen erhält der Kommissionierer ein Kärtchen mit einem aufgedruckten Barcode (im Folgenden auch als Fehlercode bezeichnet), den er unabhängig von der Art des Fehlers scannt, um im Prozess fortfahren zu können.

Um die Ergebnisse der Versuchsreihen nicht durch Lerneffekte zu verfälschen, wird die Reihenfolge, in der die Probanden die Kommissioniertechniken testen, randomisiert. Nach jedem Versuchslauf beantworten die Probanden abschließend einen Fragebogen (vgl. Anhang C), um das zuvor getestete System hinsichtlich subjektiver Kriterien zu beurteilen.

Im Anschluss an die drei Versuchsreihen werden die im Folgenden beschriebenen ergänzenden Tests durchgeführt, um Handlungsempfehlungen für die Verbesserung des Systems aus Nutzersicht ableiten zu können:

Für den längerfristigen Einsatz des Systems ist es erforderlich, dass während einer Schicht von acht Stunden der Akku etwa dreimal gewechselt wird. In Abschnitt 6.1.3 wird darauf hingewiesen, dass die Durchführung eines Akkuwechsels während des laufenden Betriebs möglich ist, und der Akku in einer gut zugänglichen Tasche der Weste untergebracht ist. Da der Akkuwechsel in den beiden Versuchsreihen mit den Pick-by-Vision Systemen nicht berücksichtigt wurde, wird ein ergänzender Test durchgeführt, bei dem die Probanden beurteilen, ob der Akkuwechsel aus ihrer Sicht schnell und einfach durchzuführen ist.

Während der Versuchsläufe mit den Pick-by-Vision Systemen war im Hinblick auf einheitliche Versuchsbedingungen ein Farbschema für die Anzeige der virtuellen Information vorgegeben. Deshalb wird ein ergänzender Test durchgeführt, bei dem die Probanden individuell Farben auswählen können. Hierzu wird das HMD des

Demonstrators getragen. Mit dem in Abbildung 7-2 gezeigten Tool¹ erfolgt die Auswahl von drei Farben aus dem dargestellten Farbraum und die Festlegung einer Rangfolge. Der Versuch wurde jeweils vor einer weißen Wand und in einer dunklen Lagerumgebung durchgeführt.

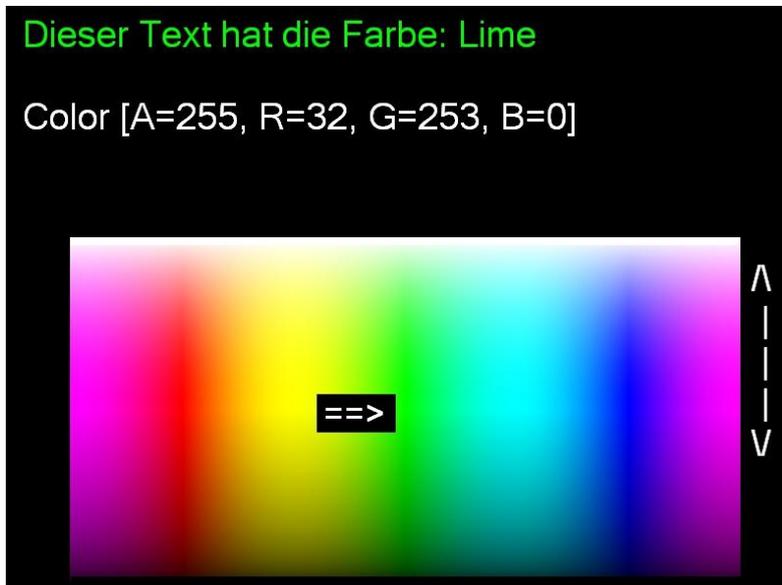


Abbildung 7-2: Tool zur Auswahl der Farbdarstellung im HMD

Ein abschließender ergänzender Test umfasst den Vergleich verschiedener HMD-Technologien hinsichtlich der Darstellungsqualität, insbesondere der Lesbarkeit, und des Tragekomforts. Für den Test stehen drei HMDs zur Verfügung, die sich in der verwendeten Projektionstechnik, dem Konzept der Kopfhaltung und dem Gewicht unterscheiden. Wichtige technische Daten der HMDs sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Für die Bewertung der HMD-Technologien wird ein identisches Testbild angezeigt, das die Probanden bereits aus den Versuchsreihen mit dem Pick-by-Vision II System kennen. Die Probanden müssen zunächst mit jedem HMD in verschiedene Richtungen blicken, nahe und ferne sowie helle und dunkle Objekte fokussieren, um anschließend den Gesamteindruck zu beurteilen und eine Rangfolge festzulegen.

¹ Die schwarze Hintergrundfarbe ist bei der Darstellung im HMD transparent.

Tabelle 7-1: Übersicht der HMDs

| HMD-Konzept | HMD 1 | HMD 2 | HMD 3 |
|----------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| HMD-Modell | Microvision Nomad ND2000 | Liteye LE 750A | Trivisio M3-Cam |
| Projektions-technik | Laserprojektion (monochrom) | Farbdisplay | Farbdisplay |
| Kopfhalterung | Flexible Textilbänder mit Klettverschluss | Flexible Kunststoffbügel mit Stellschrauben | Flexible Kunststoffbügel mit Stellschrauben |
| Gewicht ² | 230 g | 350 g | 570 g |

Die Versuchsdauer der Laborversuche einschließlich der ergänzenden Tests beläuft sich auf ca. zwei Stunden pro Proband, wobei ca. 35 bis 45 Minuten ein HMD getragen wird.

Auftragsstruktur

Insgesamt bearbeiten die Probanden mit jeder Kommissioniertechnik sechs Aufträge, nachdem sie jeweils einen Probelauf absolviert haben. Jeder Proband bearbeitet die gleichen Aufträge. Die Auftragsstruktur ist für alle drei Versuchsdurchläufe vergleichbar gestaltet. Zwar werden jeweils unterschiedliche Artikel kommissioniert, jedoch enthalten die Aufträge bei allen Techniken die identische Anzahl an Positionen, die gleiche Entnahmemenge pro Position sowie Artikel, die beispielsweise aufgrund ihrer Größe und der Greifbedingungen vergleichbar hinsichtlich des Handhabungsaufwands sind. Die Reihenfolge der Positionen ist hinsichtlich der Laufwege optimiert und wird so vorgegeben, dass der Weg stets gleich lang ist. Ein Auftrag besteht durchschnittlich aus 5,0 Positionen. Pro Position sind durchschnittlich 2,03 Entnahmeeinheiten zu kommissionieren, was in etwa dem in der Praxis üblichen Wert von 2,2 Entnahmeeinheiten pro Position entspricht [Lol-2003]. Die Aufträge enthalten u. a. schwere und große Artikel, deren Entnahme einen besonderen Handhabungsaufwand erfordert, sowie potenzielle Fehlerquellen, die der Kommissionierer erkennen muss. Die Besonderheiten der jeweiligen Aufträge sind in Tabelle 7-2 zusammengestellt.

² An einigen HMDs wurden Modifikationen vorgenommen. Die Gewichte beziehen sich auf die tatsächlich verwendeten Versuchsgeräte.

Tabelle 7-2: Auftragsstruktur bei den Probandenversuchen

| Auftrag | Anzahl der Positionen | Picks pro Auftrag | Besonderheit |
|---------|-----------------------|-------------------|--------------------------|
| Nr. 1 | 3 | 5 | |
| Nr. 2 | 6 | 9 | |
| Nr. 3 | 9 | 18 | großer Auftrag |
| Nr. 4 | 3 | 4 | Fehler: falscher Artikel |
| Nr. 5 | 6 | 12 | schwerer Artikel |
| Nr. 6 | 3 | 13 | viele Picks/Position |
| Summe | 30 | 61 | |

Um die Versuchsreihen mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ und damit der AR-unterstützten Kommissionierung ohne einem zusätzlichen Prüfmechanismus vergleichen zu können, sind die Aufträge der Versuchsreihen an die Auftragslisten der Evaluierung im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ angepasst.

Probandenstruktur

Insgesamt nehmen 17 Probanden an den Labortests teil. Es handelt sich dabei um Akademiker und Studenten technischer Studienrichtungen. Tabelle 7-3 enthält einen Überblick über die Probandenstruktur.

Tabelle 7-3: Probandenstruktur bei der Evaluation im Labortest

| | | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Anzahl der Probanden | 17 | | |
| Geschlecht | 5 weiblich | 12 männlich | |
| Durchschnittliches Alter | 27,5 Jahre | | |
| Alterspanne | von | 22 Jahre | bis 33 Jahre |
| Beruf | 13 Akademiker | | 4 Studenten |
| Vorkenntnisse | keine Erfahrung | etwas Erfahrung | große Erfahrung |
| 3D-Erfahrung | 9 Probanden | 6 Probanden | 2 Probanden |
| Kommissioniererfahrung | 9 Probanden | 7 Probanden | 2 Probanden |
| Deutsch ist Fremdsprache | 3 Probanden | | |

Die Probanden repräsentieren eine technikaffine Gruppe und sind im Durchschnitt jünger, als dies bei Kommissionierern in der Praxis der Fall ist. Andererseits haben die Probanden kaum Erfahrung mit der Kommissionierung.

7.1.2 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Versuchsreihen des Labortests werden in einem ersten Schritt die aufgetretenen Kommissionierfehler einschließlich der jeweiligen Fehlerarten und die Kommissionierzeit untersucht. Beide Kriterien werden zudem hinsichtlich des Einflusses von Lerneffekten, der 3D- bzw. Kommissioniererfahrung sowie der Auftragsstruktur untersucht. In einem zweiten Schritt erfolgt die Auswertung der in Fragebögen erfassten subjektiven Beurteilungen der Probanden. Abschließend wird die Auswertung der ergänzenden Tests vorgenommen. Diese umfassen die Bewertung eines Akkuwechsellvorgangs, die Auswahl eines Farbschemas für die Darstellung der virtuellen Information im HMD und die Beurteilung verschiedener HMD-Technologien.

Von den 17 Probanden musste ein Proband die Versuchsreihe mit dem System Pick-by-Vision II vorzeitig abbrechen, weil große Schwierigkeiten bei der Informationsaufnahme auftraten. Als Grund hierfür ist einerseits die Sprachbarriere zu nennen, da der Proband kaum über deutsche Sprachkenntnisse verfügte und für die Laborversuche keine geeignete Sprachversion des Systems zur Verfügung stand. Andererseits konnte der Proband das HMD nicht so vor dem Auge positionieren, dass er eine scharfe Darstellung der virtuellen Information erhielt. Deshalb wird dieser Proband bei der nachfolgenden Auswertung nicht miteinbezogen und nur die 16 Probanden berücksichtigt, von denen die Daten aller Versuchsreihen vollständig vorliegen.

Kommissionierfehler

Bei der Betrachtung der Fehlerquote (vgl. Abbildung 7-3 links) fällt zunächst auf, dass diese in den Laborversuchen deutlich höher liegt als die in Abschnitt 2.2.3.3 und Abschnitt 3.3 genannten Werte aus der Praxis. Diese Beobachtung ist darauf zurückzuführen, dass sich die Probanden, insbesondere wenn es sich nicht um berufserfahrene Kommissionierer handelt, während der kurzen Versuche in der Anlernphase befinden [Lol-2003]. Deshalb kann die in den Versuchen gemessene Fehlerquote nicht für den direkten Vergleich mit realen Kommissioniersystemen herangezogen werden. Vielmehr sind die relativen Unterschiede zwischen den einzelnen

Techniken relevant für die Bewertung des neuen fehlersicheren Systems Pick-by-Vision II. Bei dieser Betrachtung fällt zunächst auf, dass die Liste mit 2,08 % im Vergleich zu den beiden Pick-by-Vision Systemen die niedrigste Fehlerquote aufweist.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass 5 Probanden teilweise Kommissioniertechniken systematisch falsch angewandt bzw. den Prozess zunächst falsch verstanden haben. Diese systematischen Fehler umfassen zum einen den Fall, dass Probanden mit den Pick-by-Vision Systemen regelmäßig Artikel mittels der Fehlereingabe quittiert haben, ohne zu prüfen, ob es sich um den richtigen oder den falschen Artikel handelte. Insbesondere mit dem System Pick-by-Vision Barcode wurde anstatt der an den Artikeln angebrachten Barcode-Etiketten der Fehlercode gescannt, wodurch sich erklären lässt, dass bei dieser Technik mit 3,13 % die höchste Fehlerquote auftrat. Außerdem ist es mehrmals vorgekommen, dass die Probanden nach der Entnahme als richtig identifizierte Artikel trotzdem wieder zurück in das Entnahmefach gelegt haben, weil sie sich – insbesondere zu Beginn der Versuchsreihe – unsicher waren, ob sie den Kommissioniervorgang richtig durchgeführt haben. Dieser Fehler durch Zurücklegen wird auf ein falsches Verständnis des Prozesses zurückgeführt und ebenfalls als systematischer Fehler gewertet. Um die Messung der Kommissionierzeit nicht zu beeinträchtigen, werden die Probanden während der Bearbeitung des jeweiligen Auftrages nicht auf ihre Fehler hingewiesen, sondern die Ergebnisse im Anschluss korrigiert. Die Korrektur führt zu dem in Abbildung 7-3 rechts gezeigten Ergebnis.

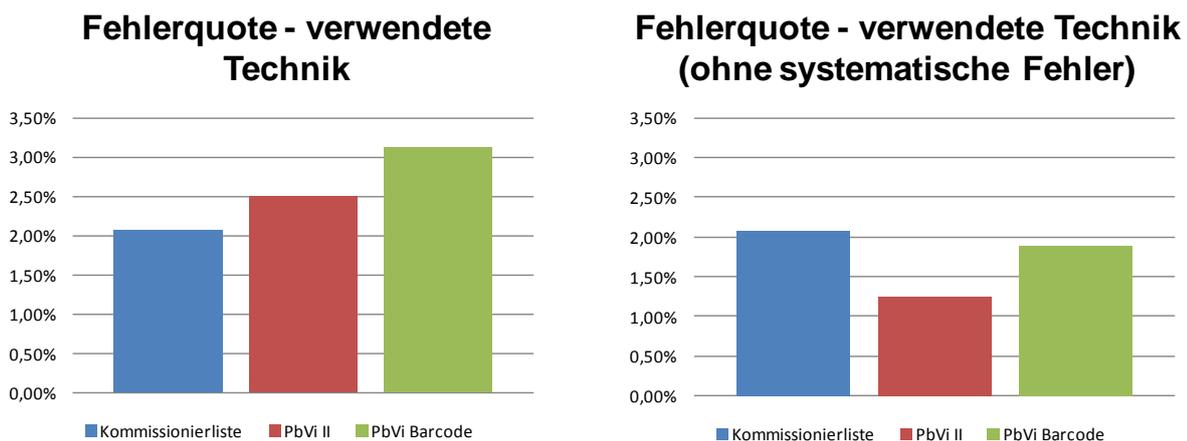


Abbildung 7-3: Fehlerquote in Abhängigkeit von der verwendeten Technik mit und ohne systematische Fehler im Laborversuch

Die beiden Pick-by-Vision Systeme schneiden nach der Korrektur der systematischen Fehler deutlich besser ab als die Liste. Insbesondere beim System Pick-by-

Vision II, mit dem im Vergleich zur Liste die Fehlerquote auf etwa die Hälfte gesenkt werden kann, lässt sich das Potenzial zur Fehlervermeidung erkennen, auch wenn eine Null-Fehler-Kommissionierung nicht erreicht wird.

Die Häufigkeit der einzelnen Fehlerarten ist der Abbildung 7-4 zu entnehmen. Systematische Fehler sind in den gezeigten Diagrammen bereits korrigiert.

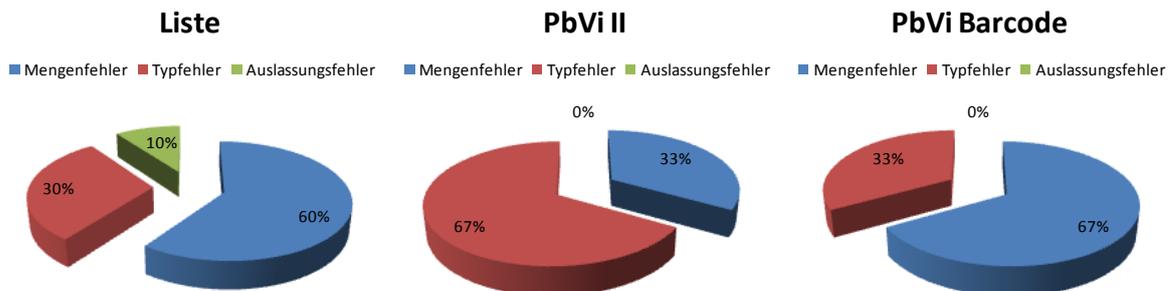


Abbildung 7-4: Fehlerarten je Technik im Laborversuch

Bei der Liste war ein hoher Anteil an Mengenfehlern, gefolgt von Typ- und Auslassungsfehlern festzustellen. Dies entspricht qualitativ den in der Abbildung 3-6 (Seite 42) dargestellten Anteilen der Fehlerarten in realen Kommissioniersystemen. Bei den beiden Pick-by-Vision Systemen traten jeweils keine Auslassungsfehler auf. Die Ergebnisse der beiden Systeme unterscheiden sich jedoch darin, dass der jeweilige Anteil der Mengen- und Typfehler abweicht. Der höhere Anteil der Mengenfehler bei der Arbeit mit dem System Pick-by-Vision Barcode, bei dem insgesamt um 50 % mehr Fehler als bei Pick-by-Vision II auftraten, kann darauf zurückgeführt werden, dass die erste Entnahmeeinheit einer Position mehrmals gescannt wurde, und der Kommissionierer sich bei der anschließenden Entnahme nicht mehr an die richtige Stückzahl erinnerte. Dieser auch in der Praxis häufig vorkommende Fehler (vgl. Abschnitt 3.2) war vereinzelt auch während der Versuchsreihen des Labortests zu beobachten.

Die Analyse der in einzelnen Aufträgen aufgetretenen Fehler führt zu dem in Abbildung 7-5 dargestellten Ergebnis. Es lässt sich feststellen, dass die Fehlerquote im Auftrag 4, in dem ein definierter Fehler eingebaut war, bei allen drei Techniken deutlich ansteigt. Im Vergleich der drei Techniken treten bei der Kommissionierliste deutlich weniger Fehler auf als bei den beiden Pick-by-Vision Systemen. Dies lässt sich damit erklären, dass die Probanden teilweise die Rückmeldung des Systems ignorieren und den Artikel manuell durch eine entsprechende Fehlereingabe als richtigen

Artikel quittiert und anschließend im Sammelbehälter abgelegt haben. Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich beim Auftrag 6, bei dem pro Position eine hohe Stückzahl zu entnehmen war. Hier zeigt sich, dass die Fehlerquote der beiden Pick-by-Vision Systeme jeweils deutlich unter der der Liste liegt. Dass insbesondere weniger Mengenfehler bei den Pick-by-Vision System auftreten, lässt die Schlussfolgerung zu, dass die bei beiden Pick-by-Vision Systemen realisierte artikelweise Überprüfung und Quittierung den Kommissionierer beim Ermitteln der richtigen Stückzahl unterstützt.

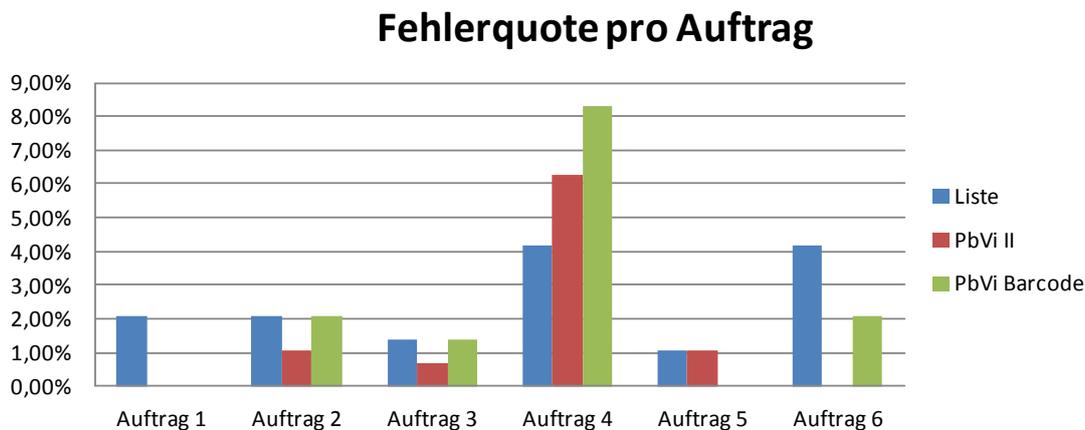


Abbildung 7-5: Fehlerquote in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur im Laborversuch

Aufgrund möglicher Lerneffekte absolvierte jeder Proband die drei Versuchsreihen in einer anderen Reihenfolge. Abbildung 7-6 zeigt die mit der jeweiligen Technik erzielte Fehlerquote in Abhängigkeit davon, in welchem Versuchslauf (Technik 1 bis Technik 3) diese getestet wurde. Es zeigt sich, dass der Verlauf für jede Technik sehr unterschiedlich ist. Teilweise steigt mit fortschreitender Übung im Kommissionieren die Fehlerquote sogar an. Es kann also im Rahmen der kurzen Labortests nicht bestätigt werden, dass Probanden weniger Fehler machen, je länger sie kommissionieren. Neben dem in Abbildung 7-6 gezeigten Vergleich aller drei Techniken, kann auch bei einer gesonderten Betrachtung der beiden Pick-by-Vision Systeme nicht bestätigt werden, dass weniger Fehler auftreten, wenn der Proband bereits zuvor mit dem jeweils anderen Pick-by-Vision System gearbeitet hat.

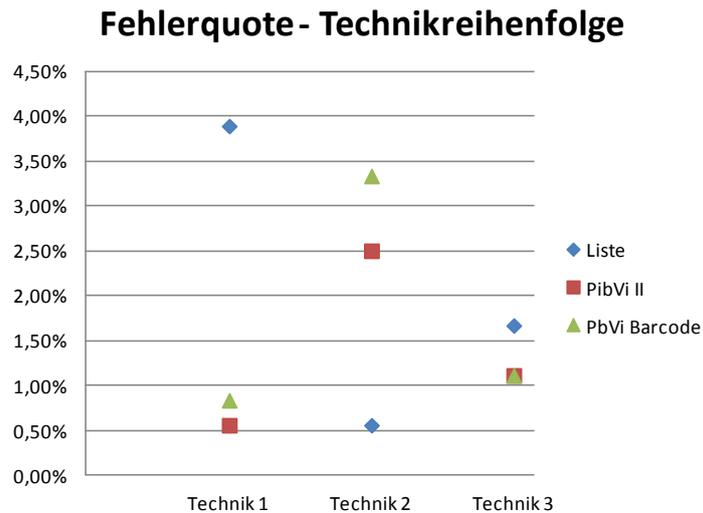


Abbildung 7-6: Fehlerquote in Abhängigkeit von der Technikreihenfolge im Laborversuch

Die differenzierte Betrachtung der Fehlerquote in Abhängigkeit von der Probandenstruktur in Abbildung 7-7 soll zeigen, inwiefern sich Erfahrung im Bereich der Kommissionierung oder mit der 3D-Technologie auf die Fehlerquote auswirkt.

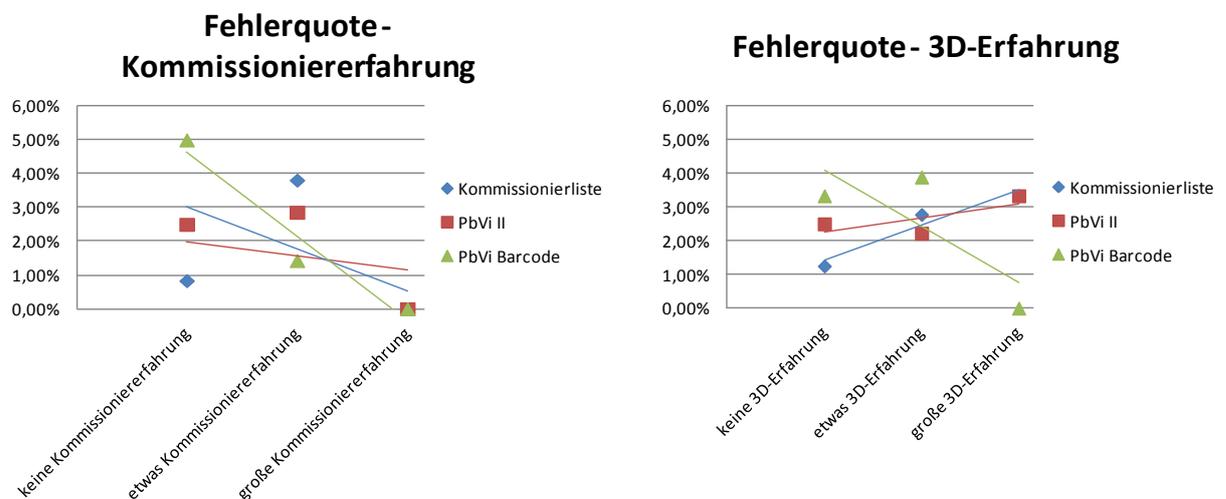


Abbildung 7-7: Einfluss der Kommissionier- und 3D-Erfahrung auf die Fehlerquote im Laborversuch

Bei beiden Diagrammen fällt auf, dass die Fehlerquote sowohl mit steigender Kommissionier- als auch 3D-Erfahrung abgesehen von einer Ausnahme nicht streng monoton fallend oder steigend verläuft. Dennoch ist anhand der Trendlinien festzustellen, dass mit steigender Kommissioniererfahrung tendenziell bei allen Techniken weniger Fehler auftreten. Bei Probanden, die im Fragebogen angaben, große Kommissioniererfahrung zu besitzen, ist bei keiner Kommissioniertechnik ein Fehler auf-

getreten. Ein Einfluss der 3D-Erfahrung auf die Fehlerquote (vgl. Abbildung 7-7 rechts) ist hingegen bei keiner Technik zu erkennen.

Kommissionierzeit

Beim Vergleich der mittleren Kommissionierzeiten je Technik anhand der Abbildung 7-8 lassen sich deutliche Unterschiede feststellen. Wie aufgrund der in Abschnitt 3.3 geschilderten Beobachtungen erwartet, war ein Proband mit Pick-by-Vision durch die Verwendung des Barcode-Scanners um 12 % langsamer als mit der Kommissionierliste, mit der er 12 min 8 s benötigte um alle sechs Aufträge zu bearbeiten. Das Pick-by-Vision System mit der Kamera erforderte mit 16 min 2 s die höchste Kommissionierzeit. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass im Hinblick auf eine möglichst umfassende Fehlervermeidung jede einzelne Entnahmeeinheit geprüft wird. Andererseits hat sich herausgestellt, dass für das richtige Halten des Artikels bei der Erfassung des optischen Codes eine gewisse Übung erforderlich ist.

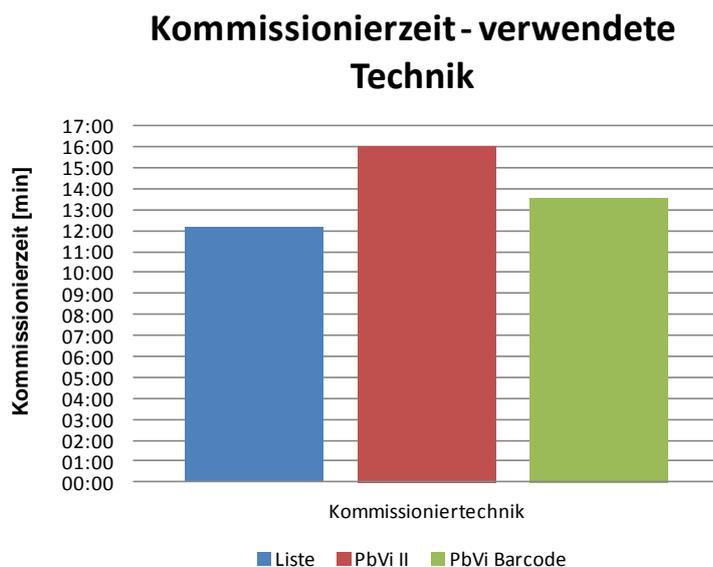


Abbildung 7-8: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der verwendeten Technik im Laborversuch

Die Pickleistung hängt nicht nur von der verwendeten Technik, sondern auch von der Auftragsstruktur ab, wie Abbildung 7-9 zeigt. Durch den im Auftrag 4 eingebauten Fehler nimmt die Pickleistung hier bei allen drei Techniken deutlich ab, da die Probanden einige Zeit benötigen, um den Fehler zu identifizieren und entsprechend zu dokumentieren. Während sich die Pickleistung bei den Aufträgen 1 bis 5 zwischen den einzelnen Systemen nur in geringem Maße unterscheidet, sind beim Auftrag 6 deutliche Unterschiede festzustellen. Durch die hohe Stückzahl pro Position

beim Auftrag 6 und die artikelweise Überprüfung kommt der Zeitaufwand für die Fehlerüberprüfung bei den beiden Pick-by-Vision Systemen hier stärker zum Tragen.

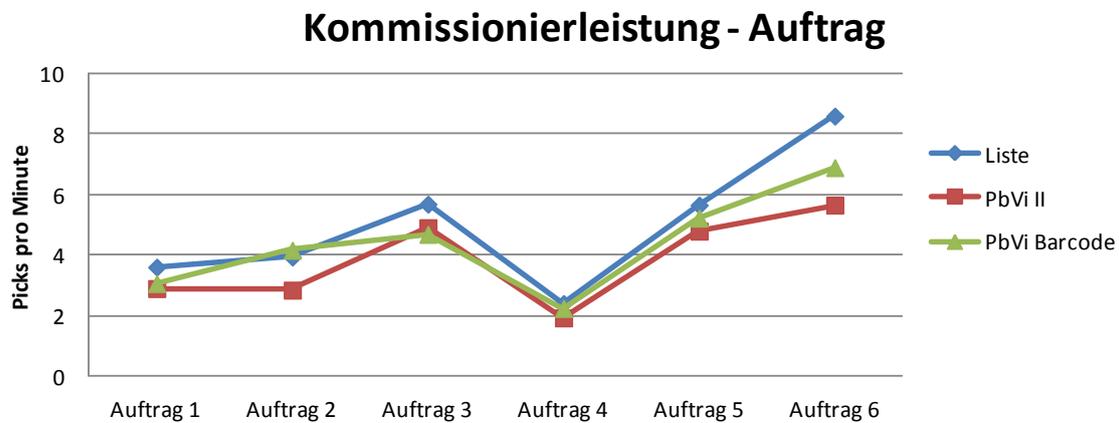


Abbildung 7-9: Pickleistung in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur im Laborversuch

Im Gegensatz zur Fehlerquote ist bei der Kommissionierzeit von einem Einfluss von Lerneffekten auszugehen. Abbildung 7-10 zeigt, dass die Probanden tendenziell mit jeder Technik schneller werden, auch wenn teilweise beim zweiten Versuchsdurchlauf eine höhere Kommissionierzeit als beim ersten bzw. eine niedrigere Kommissionierzeit als beim dritten Versuch auftraten.

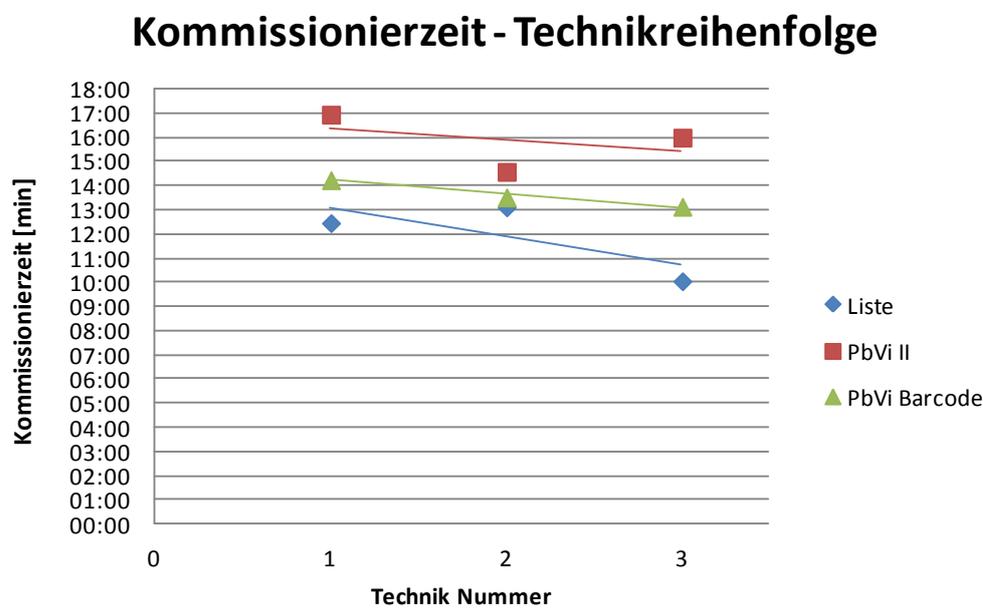


Abbildung 7-10: Einfluss von Lerneffekten auf die Kommissionierzeit im Laborversuch

Bei einer gesonderten Betrachtung der beiden Pick-by-Vision Systeme lässt sich feststellen, dass Probanden, die in einem vorangegangenen Versuchslauf bereits mit

einem Pick-by-Vision System gearbeitet haben, schneller waren als Probanden, die zum ersten Mal ein Pick-by-Vision System verwendeten. So waren beispielsweise Probanden mit Pick-by-Vision II um 6 % und mit Pick-by-Vision Barcode um 7 % schneller beim zweiten Versuchslauf mit einem Pick-by-Vision System als Probanden, die zum ersten Mal mit einem Pick-by-Vision System gearbeitet haben.

Der Verlauf der Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der Kommissionier- und 3D-Erfahrung der Probanden in Abbildung 7-11 zeigt, dass Probanden mit jeweils größerer Erfahrung bei allen drei Techniken tendenziell schneller waren als Probanden, die weniger Erfahrung auf dem Gebiet der Kommissionierung oder im Umgang mit 3D-Technologien hatten.

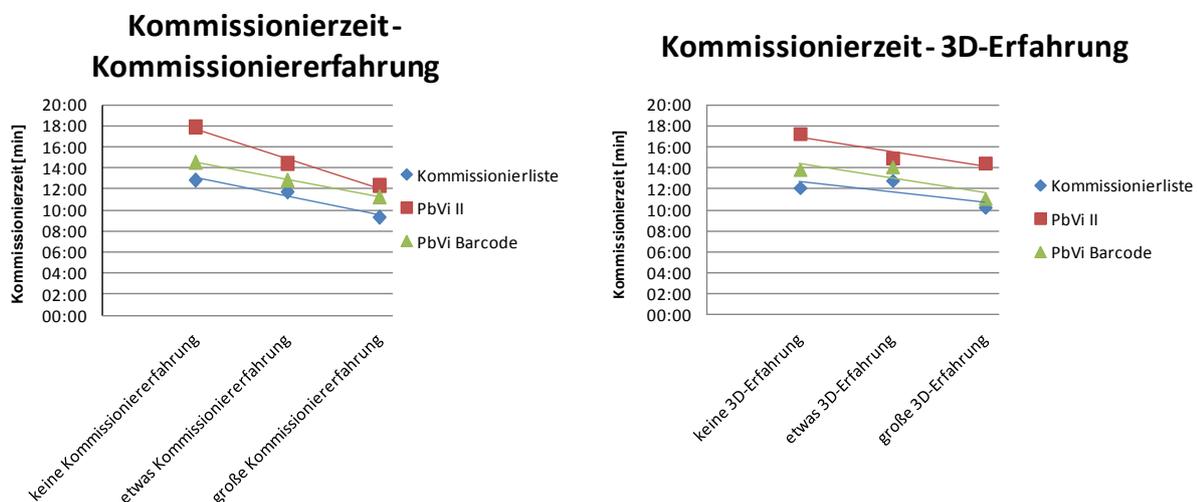


Abbildung 7-11: Einfluss der Kommissionier- und 3D-Erfahrung auf die Kommissionierzeit im Laborversuch

Beim Vergleich der Liste mit den beiden Pick-by-Vision Systemen ist festzustellen, dass im Vergleich zur Liste die 3D-Erfahrung keinen größeren Einfluss hatte.

Subjektive Einschätzung

Zur Bewertung der subjektiven Einschätzung der Systeme wurden Fragebögen eingesetzt. Kriterien, die den Gesamteindruck eines Systems umfassen, beispielsweise die Akzeptanz oder der Bedienkomfort eines Systems, wurden jeweils mit mehreren Fragestellungen untersucht, um Missverständnisse zu vermeiden. Die Bewertung der Fragestellungen erfolgte anhand einer Antwort-Skala in sechs Stufen. Dadurch mussten sich die Probanden im Zweifelsfall für eine eher positive oder eher negative Bewertung entscheiden. Der Grad der Zustimmung zu den einzelnen Fragestellun-

gen wird in den nachfolgenden Diagrammen durch eine Bewertung von null bis fünf Punkten repräsentiert. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde jeweils der Durchschnitt aus den Bewertungen aller Probanden gebildet.

Für die subjektive Bewertung des Gesamteindrucks einer Kommissioniertechnik wird die Akzeptanz herangezogen. Diese beinhaltet die Kriterien hilfreich, übersichtlich, interessant und ob das jeweilige System zur Aufgabenbewältigung empfohlen wird. Abbildung 7-12 zeigt, dass die Akzeptanz aller drei Systeme mit einem Wert von über 2,5 Punkten positiv bewertet wird. Die beiden Pick-by-Vision Systeme stoßen mit einer Bewertung von 3,6 Punkten auf eine etwas höhere Akzeptanz als die Kommissionierliste mit 3,2 Punkten.

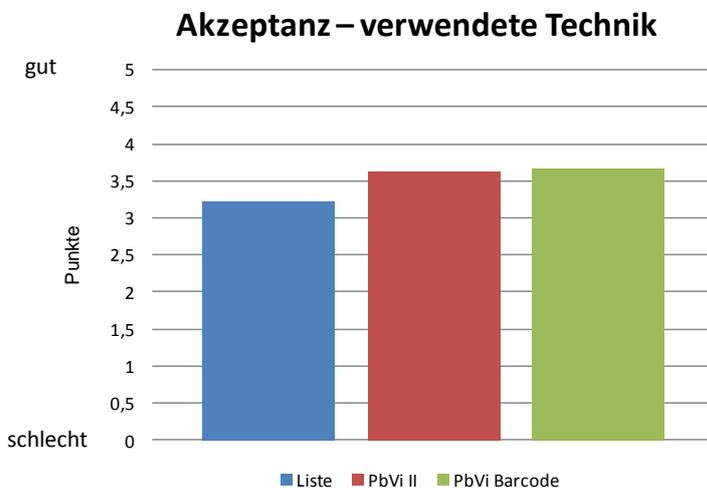


Abbildung 7-12: Akzeptanz der Kommissioniersysteme im Laborversuch

Für eine detaillierte Analyse von potenziellen Schwachstellen des Systems und die Ableitung von Handlungsempfehlungen werden im Folgenden weitere wichtige Ergebnisse der subjektiven Bewertung dargestellt.

Während die objektive Messung der Kommissionierfehlerquote zu Beginn dieses Abschnitts bereits erkennen lässt, inwiefern Pick-by-Vision Systeme zur Fehlervermeidung beitragen können, soll nachfolgend auch der subjektive Eindruck der Probanden hinsichtlich des Potenzials der Fehlervermeidung berücksichtigt werden. Abbildung 7-13 zeigt, dass die Probanden in den beiden Pick-by-Vision Systemen ein großes Potenzial hinsichtlich der Fehlervermeidung sehen, insbesondere im System Pick-by-Vision II, das mit 4,3 Punkten deutlich besser als die Liste mit 1,4 Punkten und etwas besser als Pick-by-Vision Barcode mit 3,6 Punkten abschneidet.

Hilft das System Fehler zu vermeiden?

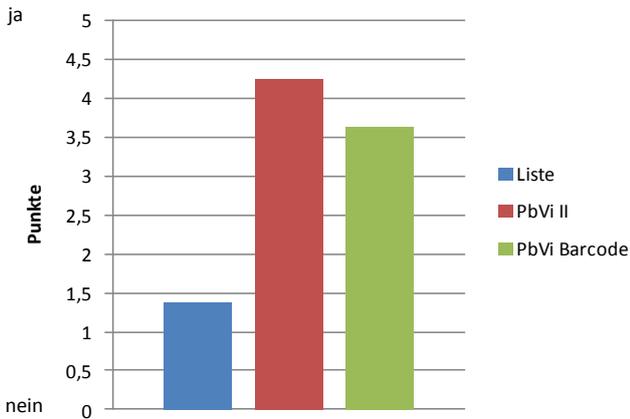


Abbildung 7-13: Bewertung des Potenzials zur Fehlervermeidung im Laborversuch

Im Hinblick darauf, dass ein fehlersicheres Pick-by-Vision System im produktiven Einsatz während eines gesamten Arbeitstages getragen werden soll, sind die Ergebnisse der Probandenversuche hinsichtlich der Beanspruchung zwar nicht repräsentativ, jedoch können kritische Einflussfaktoren bereits frühzeitig erkannt werden. Abbildung 7-14 zeigt, dass insgesamt die geistige und physische Beanspruchung mit Werten zwischen 1,2 und 1,4 bezogen auf einen Maximalwert von 5,0 Punkten bei allen drei Systemen als verhältnismäßig niedrig einzustufen ist.

Beanspruchung

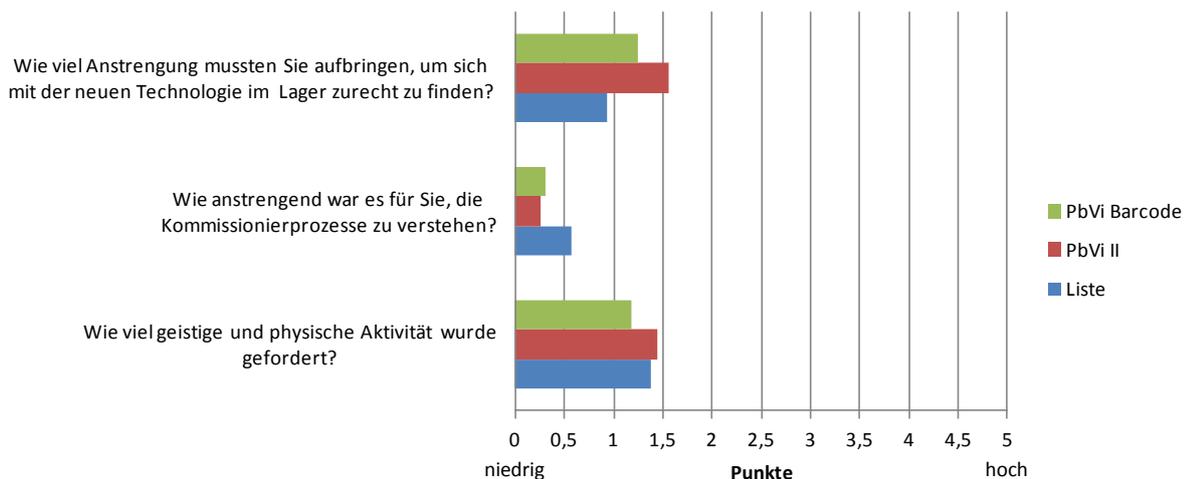


Abbildung 7-14: Bewertung der Beanspruchung im Laborversuch

Im Vergleich der drei Techniken wurde die höchste geistige und physische Aktivität bei der Arbeit mit dem System Pick-by-Vision II gefordert. Als mögliche Ursache

hierfür ist anzuführen, dass der Umgang mit der kopfbasierten Kamera noch völlig unbekannt für die Probanden war, während der Umgang mit einem Barcodescanner oder einer Papierliste allgemein bekannt ist. Dadurch lässt sich auch der Unterschied zwischen Pick-by-Vision II und Barcode erklären. Das Zurechtfinden im Lager wurde mit der Liste als weniger anstrengend beurteilt als mit den beiden Pick-by-Vision Systemen. Obwohl bei beiden Pick-by-Vision Systemen der Ablauf der Prozessführung und die grafische Benutzeroberfläche identisch gestaltet sind, schneidet Pick-by-Vision II um 25 % schlechter ab als die Barcode-Variante. Das Verstehen des Kommissionierprozesses empfanden die Probanden mit den beiden Pick-by-Vision Systemen weniger anstrengend als mit der Liste. Dies kann auf die strikte schrittweise Prozessführung durch Pick-by-Vision zurückgeführt werden.

Bewertung der Erlernbarkeit und der Interaktion

Hinsichtlich der Erlernbarkeit gaben die Probanden an, dass alle drei Systeme sehr einfach zu erlernen sind (vgl. Abbildung 7-15 links). Es ist festzustellen, dass die bereits heute eingesetzten Kommissioniertechniken Liste und Barcode etwas einfacher zu erlernen sind als das System Pick-by-Vision II. Ein Vergleich der Interaktionskonzepte der beiden Pick-by-Vision Systeme (vgl. Abbildung 7-15 Mitte) bestätigt, dass die Interaktion mit dem Pick-by-Vision II System hinsichtlich einer einfachen und eindeutigen Interaktion mit 3,9 von 5 Punkten zwar insgesamt positiv, aber schlechter als die Variante mit Barcode-Scanner bewertet wird, die 4,5 Punkte erhielt. Unter anderem wurde von den Probanden bemängelt, dass die Kamera die optischen Codes nicht immer sofort erkannt hat.

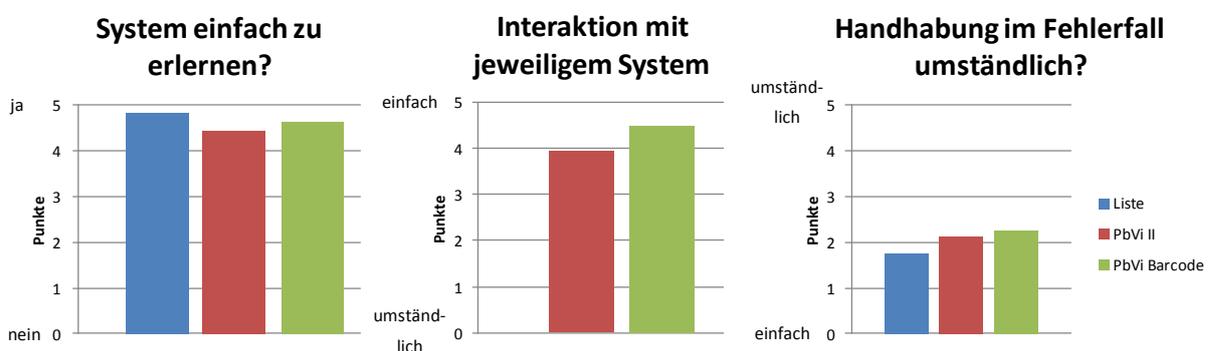


Abbildung 7-15: Bewertung der Erlernbarkeit und der Interaktion im Laborversuch

Die Handhabung im Fehlerfall (vgl. Abbildung 7-15 rechts) wird bei allen drei Systemen als wenig umständlich eingestuft. Dabei fällt auf, dass eine handschriftliche No-

tiz auf der Kommissionierliste als einfachste Handlungsoption im Fehlerfall gesehen wird. Die Probanden empfinden es weiterhin als umständlicher, mit dem Barcode-scanner einen Fehlercode auf dem entsprechenden Kärtchen zu scannen, als den entsprechenden Fehlerfall in dem in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen Fehlermenü des Systems Pick-by-Vision II auszuwählen.

Bewertung der Hardware

Zur Bewertung der Hardware werden nur die beiden Pick-by-Vision Systeme herangezogen. Diese sind abgesehen vom Mechanismus der Fehlervermeidung sowohl in ihrem Hardwareaufbau als auch hinsichtlich ihres Interaktionskonzeptes sehr ähnlich.

So überrascht es nicht, dass beide Systeme bei der in Abbildung 7-16 dargestellten Bewertung des Trage- und Bedienkomforts mit einem Wert von 3,7 Punkten gleich abschneiden. Ausgehend von einem maximal möglichen Wert von 5 Punkten kann die Bewertung beider Systeme insgesamt als positiv bezeichnet werden.

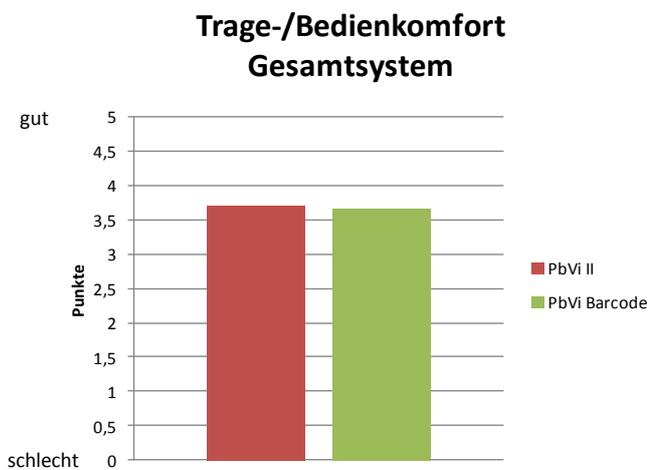


Abbildung 7-16: Bewertung des Trage-/Bedienkomforts im Laborversuch

Um Gestaltungshinweise für die Weiterentwicklung eines in der Praxis einsetzbaren fehlersicheren Pick-by-Vision Systems ableiten zu können, erfolgt neben der subjektiven Bewertung des Gesamtsystems auch die Bewertung einzelner Systemkomponenten. Im Fokus stehen das HMD, der Dreh-Drückknopf als Interaktionsgerät und der Vorgang des Akkuwechsels. Da die genannten Komponenten bei beiden Pick-by-Vision Systemen identisch sind, wird nachfolgend die gemittelte Punktzahl beider Systeme angegeben.

Die Ergebnisse der Bewertung des in den Versuchsreihen verwendeten HMDs lassen sich der Abbildung 7-17 links entnehmen. Während das HMD hinsichtlich der Sicht mit 3,6 von 5 Punkten positiv bewertet wird, bringt der Wert von 1,8 Punkten beim Gewicht zum Ausdruck, dass das HMD mit 570 g als zu schwer empfunden wurde.

Der Dreh-Drückknopf wird als Interaktionsgerät befürwortet. Abbildung 7-17 Mitte zeigt, dass die Bedienung des Systems durch Drehen und Drücken selbsterklärend ist, und die Probanden den Dreh-Drückknopf insgesamt als Steuerungseinheit für gut geeignet halten.

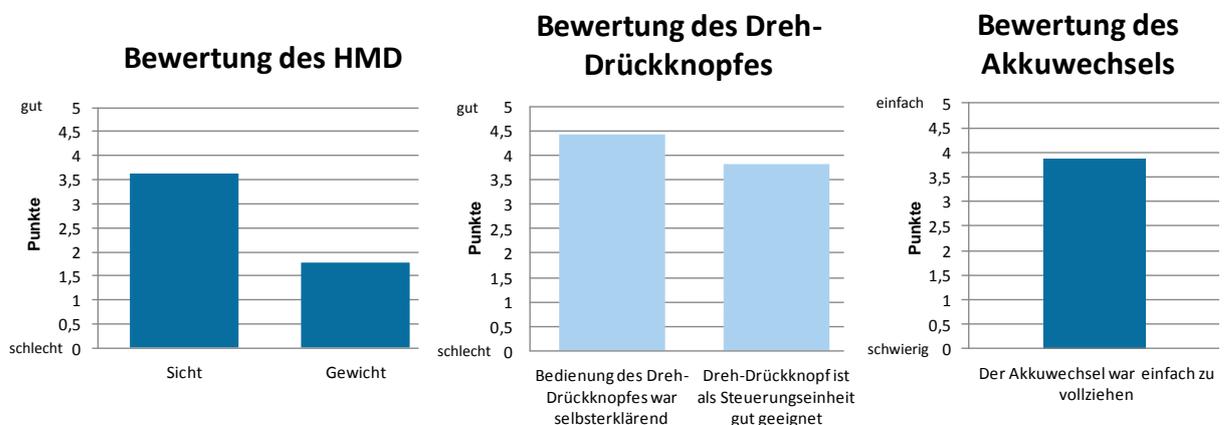


Abbildung 7-17: Bewertung einzelner Systemkomponenten im Laborversuch

Auch der Akkuwechsel während des laufenden Betriebes wird mit 3,9 Punkten als unkompliziert empfunden, wie Abbildung 7-17 rechts zeigt. Von Probanden wurden lediglich Verbesserungsvorschläge im Detail, beispielsweise die Leichtgängigkeit beim Herausnehmen des Akkus aus der Akkuhalterung, genannt.

Farbauswahl

Die freie Auswahl von drei Farben für die Darstellung der virtuellen Information im HMD jeweils vor einer weißen Wand und in einer dunkleren Lagerumgebung führte zu dem in Abbildung 7-18 links und in der Mitte dargestellten Ergebnis. Insgesamt bevorzugten die Probanden in beiden Umgebungen kräftige und helle Farben. Auffällig ist, dass bei der Versuchsdurchführung in der Lagerumgebung keine Farben aus den Bereichen dunkelblau und gold gewählt wurden, die verstärkt im Hintergrund zu sehen waren (vgl. Abbildung 7-18 Mitte). Dies lässt die Interpretation zu, dass die in

der realen Welt vorkommenden Farben die Lesbarkeit und das subjektive Empfinden der virtuellen Information in einem See-Through HMD beeinflussen.



Abbildung 7-18: Ergebnisse der Befragung zur Farbauswahl im Laborversuch

Die Funktion, die Farbe der virtuellen Darstellung im HMD individuell auswählen zu können, wird mit einem Wert von 3,5 von 5 Punkten überwiegend als hilfreich eingeschätzt (vgl. Abbildung 7-18 rechts). Dabei wird die Möglichkeit, die Farbe wie im Versuch komplett frei auszuwählen, mit einer Bewertung von 2,1 Punkten als weniger sinnvoll erachtet als die Farbauswahl aus einer vordefinierten Liste, die mit 4,4 von 5 Punkten eine deutlich bessere Bewertung erhielt.

Subjektive Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte

Die subjektive Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte führte zu dem in Abbildung 7-19 gezeigten Ergebnis. Die Punktzahl ergibt sich anhand einer gewichteten Punktbewertung, die als Kennzahl dafür verwendet wird, wie oft ein HMD auf einem bestimmten Platz genannt wurde. Dabei kann ein Konzept maximal 48 Punkte erreichen.

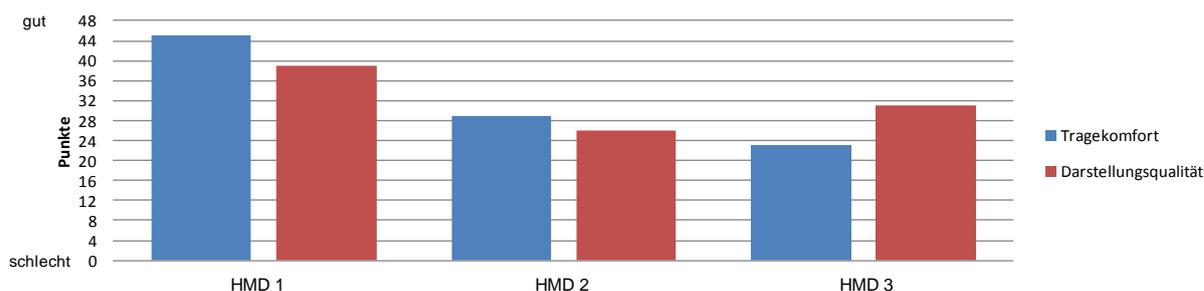


Abbildung 7-19: Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte im Rahmen des Laborversuchs

Der Vergleich mit den technischen Daten in Tabelle 7-1 (Seite 115) zeigt, dass die subjektive Bewertung der HMDs hinsichtlich des Tragekomforts mit dem Gewicht zusammenhängt. Die Probanden bevorzugen das HMD 1, das auch das geringste Gewicht unter den getesteten HMDs aufweist. Die Darstellungsqualität des HMD 1 (Laserprojektion) wurde deutlich besser bewertet als die beiden HMDs, bei denen ein Farbdisplay zur Bilderzeugung eingesetzt wird.

7.2 Evaluierung im Praxistest

Im Anschluss an die Probandenversuche unter Laborbedingungen erfolgt die Durchführung einer zweiten Versuchsreihe. Hierbei soll durch Kommissionierer aus der Praxis sichergestellt werden, dass die erzielten Ergebnisse auf reale Kommissioniersysteme übertragbar sind.

7.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Wie die Laborversuche werden auch die Praxisversuche in der in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Versuchsumgebung durchgeführt. Auch sonstige Parameter hinsichtlich der Lager- und Artikelstruktur sowie die Aufträge bleiben gegenüber den Laborversuchen unverändert, um anschließend die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen vergleichen zu können. Im Wesentlichen unterscheiden sich die beiden Versuchsreihen in der Probandenauswahl. Während beim Labortest die Probanden aus dem Umfeld der Hochschule kommen, stehen für den Praxisversuch kommissioniererfahrene Probanden aus zwei Unternehmen des PA zur Verfügung. Einen Überblick über die Probandenstruktur gibt Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Probandenstruktur bei der Evaluation im Praxistest

| | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| Anzahl der Probanden | 6 | | | |
| Geschlecht | 1 weiblich | | 5 männlich | |
| Durchschnittliches Alter | 29,8 Jahre | | | |
| Alterspanne | von | 17 Jahre | bis | 50 Jahre |
| Beruf | 4 Fachkraft für Lagerlogistik | | 2 Groß- und Außenhandelskaufmann | |
| Vorkenntnisse | keine Erfahrung | etwas Erfahrung | | große Erfahrung |
| 3D-Erfahrung | 4 Probanden | 1 Proband | 1 Proband | |
| Kommissioniererfahrung | 0 Probanden | 0 Probanden | 6 Probanden | |
| Deutsch ist Fremdsprache | 1 Proband | | | |

Aus Gründen der Durchführbarkeit wurde das Versuchsprogramm des Praxisversuchs an einigen Stellen komprimiert, an denen keine grundsätzlich andere Aussage zu erwarten war. So werden lediglich die Kommissioniertechniken Pick-by-Vision II und Kommissionierliste im Vergleich getestet. Die ergänzenden Tests werden auf den Vergleich verschiedener HMD-Technologien reduziert. Da sich während der Labortests herausgestellt hat, dass bei einigen Probanden Probleme aufgetreten sind, weil das HMD oft verrutscht ist, und einige Probanden es als schwierig empfanden, die Kopfhalterung so einzustellen, dass das HMD fest am Kopf sitzt, werden beim Vergleich verschiedener HMD-Technologien als zusätzliche Kriterien der feste Sitz und die Einstellbarkeit betrachtet. Insgesamt beträgt die Versuchsdauer bei den Praxisversuchen ca. eine Stunde pro Proband. Davon wird während einer Dauer von ca. 20 bis 30 Minuten ein HMD getragen.

7.2.2 Ergebnisse

Bei den Praxisversuchen haben alle sechs Probanden die beiden Versuchsläufe und die ergänzenden Tests vollständig absolviert. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

Kommissionierfehler

In einem ersten Schritt erfolgt analog zu den Labortests die Betrachtung der Fehlerquote in Abhängigkeit von der jeweils verwendeten Kommissioniertechnik. Abbil-

Abbildung 7-20 links zeigt, dass mit dem System Pick-by-Vision II die Fehlerquote bei 3,89 % lag, wohingegen mit der Liste nur 1,67 % der Positionen fehlerhaft waren. Diese Werte liegen, wie bereits bei den Labortests festgestellt, deutlich über der Fehlerquote durchschnittlicher realer Kommissioniersysteme.

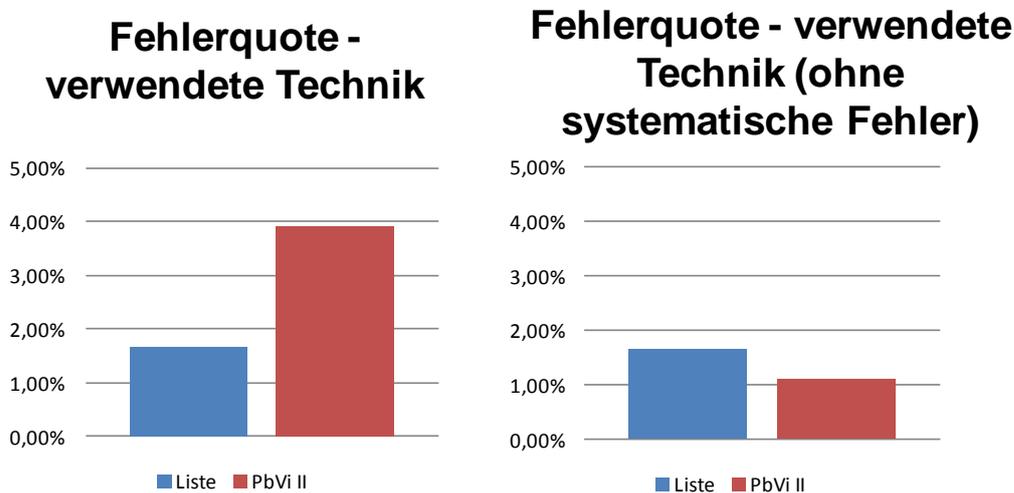


Abbildung 7-20: Einfluss der Kommissioniertechnik auf die Fehlerquote im Praxisversuch

Im Vergleich zu den Labortests traten weniger Fehler bei der Arbeit mit der Liste, jedoch deutlich mehr Fehler mit Pick-by-Vision II auf. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass die Probanden auch in den jeweiligen Unternehmen mit einer Kommissionierliste arbeiten. Auch in den Praxisversuchen, insbesondere bei einem Probanden, traten systematische Fehler bei der Bedienung des Systems Pick-by-Vision II auf. Die Korrektur dieser Fehler führt zu dem in Abbildung 7-20 rechts gezeigten Ergebnis.

Wie bei den Labortests kommt es in den Aufträgen 4 und 6 verstärkt zu Fehlern mit der Kommissionierliste. Im Gegensatz zu den Probanden in den Labortests haben die Probanden aus der Praxis den in Auftrag 4 eingebauten Fehler mit dem System Pick-by-Vision II stets erkannt und diesen entsprechend dokumentiert.

Bei einer detaillierten Betrachtung der einzelnen Fehlerarten nach der Korrektur der systematischen Fehler lässt sich feststellen, dass bei keiner Technik Auslassungsfehler auftraten. Während bei der Liste 67 % der Fehler dem Typfehler und 33 % dem Mengenfehler zuzuordnen sind, handelt es sich bei den mit Pick-by-Vision II begangenen Fehlern ausschließlich um Mengenfehler.

Kommissionierzeit

Beim Vergleich der Kommissionierzeiten in Abhängigkeit von der verwendeten Technik lässt sich feststellen, dass die Probanden mit dem System Pick-by-Vision II deutlich langsamer arbeiten als mit der Kommissionierliste. Abbildung 7-21 zeigt, dass die Probanden mit der Liste durchschnittlich für die Bearbeitung der sechs Aufträge 11 min 49 s benötigen, während die Kommissionierzeit mit Pick-by-Vision II mit 15 min 58 s um 35,0 % höher liegt.

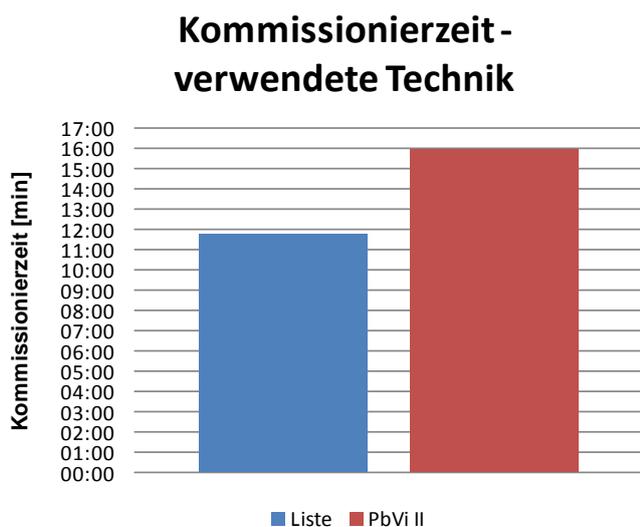


Abbildung 7-21: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der verwendeten Technik im Praxisversuch

Im Wesentlichen entspricht diese Beobachtung auch den Ergebnissen des Labortests. Während die Probanden aus der Praxis mit der Liste um 2,6 % schneller als die Probanden in den Labortests waren, waren die Probanden aus der Praxis mit dem System Pick-by-Vision II nur um 0,4 % schneller.

Der Einfluss der Auftragsstruktur auf die Pickleistung äußert sich insbesondere in den Aufträgen 4 und 6. Wie bei den Laborversuchen, sank die Pickleistung beim Auftrag 4, in dem ein definierter Fehler eingebaut war, sowohl bei der Liste als auch beim System Pick-by-Vision II auf einen Wert von ca. 2 Picks pro Minute. Beim Auftrag 6 wird mit dem System Pick-by-Vision II nur eine Pickleistung von ca. 5 Picks pro Minute erzielt, während mit der Liste die Pickleistung bei ca. 9 Picks pro Minute liegt.

Im Gegensatz zu den Laborversuchen erscheint eine Betrachtung möglicher Lerneffekte sowohl bei der Kommissionierzeit als auch der Fehlerquote nicht sinnvoll, da

von den sechs Probanden jeweils nur zwei Probanden Pick-by-Vision II als erste bzw. die Kommissionierliste als zweite Technik verwendet haben. Alle Probanden haben berufsbedingt eine große Kommissioniererfahrung, wodurch sich auch eine Auswertung der Fehlerquote bzw. der Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der Kommissioniererfahrung erübrigt. Zudem gab jeweils nur ein Proband an, etwas bzw. große Erfahrung mit 3D-Technologien zu besitzen, so dass eine Betrachtung logistischer Kennzahlen unter dem Aspekt der 3D-Erahrung der Probanden ebenfalls nicht repräsentativ wäre.

Subjektive Bewertung

Analog zu den Labortests wurde auch im Rahmen der Praxistests eine subjektive Beurteilung der beiden Techniken Kommissionierliste und Pick-by-Vision II durchgeführt. Da die Praxisversuche im Wesentlichen dazu dienen, die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Labortests auf reale Kommissioniersysteme zu überprüfen, werden im Folgenden nicht mehr alle einzelnen Ergebnisse der Praxistests sondern lediglich Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den Labortests beschrieben.

Hinsichtlich des Kriteriums Akzeptanz, des Trage- und Bedienkomforts sowie auf die Frage, ob die jeweilige Kommissioniertechnik dazu beiträgt, Fehler zu vermeiden, konnten keine nennenswerten Unterschiede zu den Labortests festgestellt werden. Die Ergebnisse der Beurteilung hinsichtlich der Beanspruchung sind in Abbildung 7-22 dargestellt.

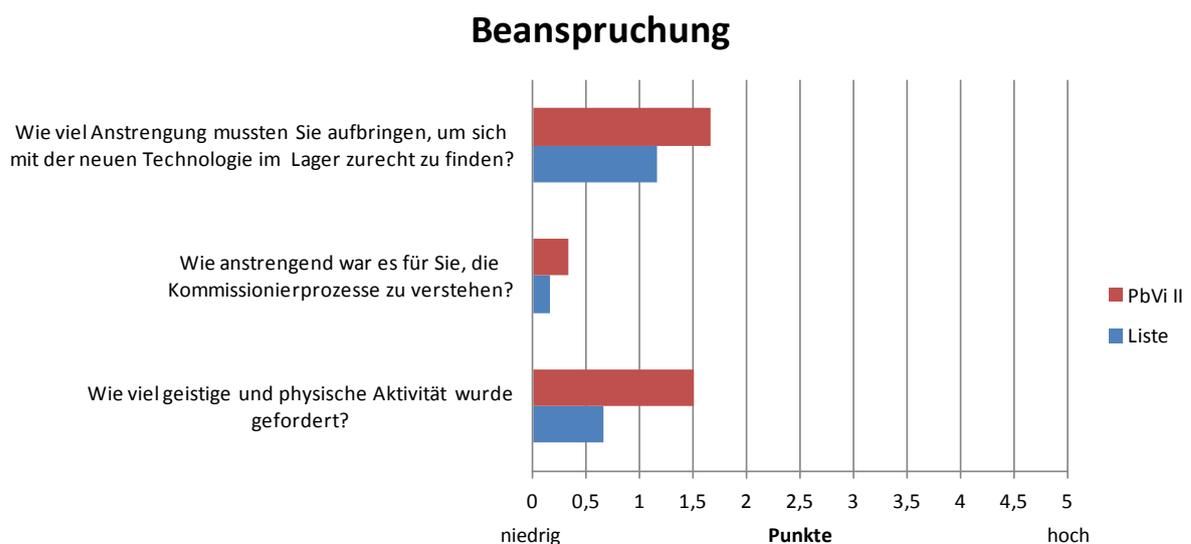


Abbildung 7-22: Bewertung der Beanspruchung im Praxisversuch

Die Bewertung der geistigen und physischen Aktivität, die gefordert wurde, entspricht beim System Pick-by-Vision II den Ergebnissen des Labortests. Die Beanspruchung durch die Liste empfanden die Probanden aus der Praxis hingegen als deutlich geringer. Als mögliche Ursache hierfür ist zu nennen, dass die Probanden aus den jeweiligen Unternehmen bereits umfangreiche Praxiserfahrung mit der beleggebunden Kommissionierung besitzen. Dies könnte auch eine mögliche Erklärung dafür sein, dass die Anstrengung, die aufgebracht werden musste, um den Kommissionierprozess zu verstehen, beim System Pick-by-Vision II deutlich höher eingeschätzt wurde als bei der Liste.

Die Bewertung des Trage- und Bedienkomforts, der Erlernbarkeit, des Interaktionskonzeptes und der verwendeten Hardware erfolgte analog zu den Labortests. In keinem der untersuchten Kriterien waren nennenswerte Abweichungen zu den Laborversuchen festzustellen, weshalb an dieser Stelle auf eine ausführliche Darlegung der einzelnen Ergebnisse verzichtet wird.

Die Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte im Rahmen der ergänzenden Tests der Praxisversuche führte zu einem ähnlichen Ergebnis wie bei den Laborversuchen. Allerdings liegt bei den Praxisversuchen die maximal erreichbare Punktezahl eines HMD-Konzeptes bei 18 Punkten. Hinsichtlich der Kriterien Tragekomfort und Darstellungsqualität gab es keine nennenswerten Unterschiede zu den Labortests. Da die Probanden in den Labortests mehrmals bemängelt haben, dass sie das verwendete HMD nicht richtig am Kopf fixieren konnten, wird bei der Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte zusätzlich die Neigung zu verrutschen und die Einstellbarkeit untersucht. Abbildung 7-23 zeigt eine Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse.

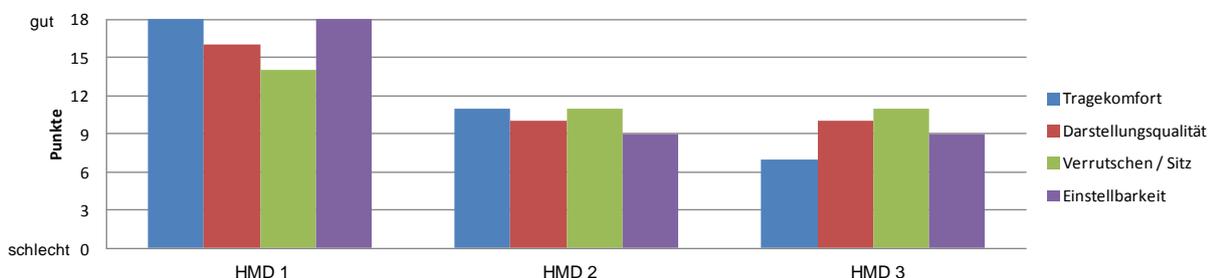


Abbildung 7-23: Vergleich verschiedener HMD-Konzepte im Rahmen des Praxisversuchs

Hinsichtlich der Neigung zu verrutschen wird das HMD 1 am besten bewertet. Auch in Bezug auf die Einstellbarkeit schneidet das HMD 1 deutlich besser ab als die

HMDs 2 und 3. Die Probanden empfinden es also als deutlich einfacher, das HMD durch flexible Textilbänder und zwei Klettverschlussverbindungen am Kopf zu fixieren, als die Bügel einer Kopfhalterung mittels Stellschrauben zu justieren.

7.3 Fazit Evaluierung

Die Evaluierung sowohl in den Labor- als auch in den Praxistests zeigte, dass sich mit einem fehlersicheren Pick-by-Vision System die Fehlerquote um ca. 40 % gegenüber der klassischen Belegkommissionierung reduzieren ließ und unterstreicht damit dessen Potenzial hinsichtlich der Fehlervermeidung. Auch der subjektive Eindruck der Probanden bestätigt dies. Allerdings traten bei der Bedienung des neuen Kommissioniersystems auch systematische Fehler auf. Dies bestätigt die Aussage von Gudehus, dass die Null-Fehlerkommissionierung grundsätzlich nicht erreichbar ist [Gud-2005], auch dann nicht, wenn die Überprüfung jeder einzelnen Entnahmeeinheit durch ein Identifikationssystem erfolgt.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführten Labortests im Rahmen der Forschungsprojekte „Pick-by-Vision“ und „Pick-by-Vision II“ in Tabelle 7-5 stellt die Basis für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar. Es ist zu erkennen, dass gegenüber der Kommissionierung mit Liste durch den Einsatz eines Pick-by-Vision Systems eine Reduktion der Fehlerquote um 12,14 % möglich ist. Durch die Verwendung einer Variante mit Trackingsystem bzw. einem Prüfmechanismus lässt sich die Fehlerquote gegenüber der Belegkommissionierung sogar um 50,00 % bzw. 39,90 % reduzieren. Während bei den Pick-by-Vision Systemen ohne Fehlerüberprüfung jeweils gleichzeitig der Kommissionierprozess beschleunigt wurde, bewirkt die Fehlerüberprüfung in den Laborversuchen eine Verlangsamung des Kommissionierprozesses. Diese Verlangsamung lässt sich damit erklären, dass bei dem getesteten Konzept der Fehlervermeidung jede einzelne Entnahmeeinheit überprüft werden muss. In den Laborversuchen waren die Kommissionierer durchschnittlich mit dem System Pick-by-Vision II um 32,13 % langsamer als mit der Kommissionierliste. Insbesondere bei einem Kommissionierauftrag, der viele Entnahmeeinheiten pro Position aufweist, konnte dieser Effekt verstärkt beobachtet werden. Im Vergleich zu der Pick-by-Vision Variante mit Barcodescanner lag die Kommissionierzeit des Systems Pick-by-Vision II immerhin noch um 18,0 % höher. Dies ist u. a. auch darauf zurückzuführen, dass der Umgang mit der kopfbasierten Kamera ein völlig neues Interaktionskonzept darstellt, während den

Probanden der Umgang mit einer Kommissionierliste oder einem Barcodescanner bereits bekannt war. Bei einer ausreichend langen und umfassenden Einarbeitung ist davon auszugehen, dass Kommissionierer mit dem System Pick-by-Vision II in der Praxis noch schneller werden und systematische Fehler vermieden werden können.

Tabelle 7-5: Vergleich unterschiedlicher Pick-by-Vision Systeme hinsichtlich logistischer Kennzahlen

| Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ Labortest (ohne systematische Fehler) | Fehlerquote [%] | Kommissionierzeit [min] |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Kommissionierliste | 1,40 % | 13,86 |
| Pick-by-Vision (ohne Tracking) | 1,23 % | 12,65 |
| Pick-by-Vision (mit Tracking) | 0,70 % | 12,41 |
| Forschungsprojekt „Pick-by-Vision II“ Labortest (ohne systematische Fehler) | Fehlerquote [%] | Kommissionierzeit [min] |
| Kommissionierliste | 2,08 % | 12,14 |
| Pick-by-Vision II (kopfbasierte Kamera) | 1,25 % | 16,04 |
| Einsparpotenzial gegenüber der Kom- missionierliste | Einsparpotenzial Fehlerquote [%] | Einsparpotenzial Kommissionierzeit [%] |
| Pick-by-Vision (ohne Tracking) | - 12,14 % | - 8,73 % |
| Pick-by-Vision (mit Tracking) | - 50,00 % | - 10,46 % |
| Pick-by-Vision II (kopfbasierte Kamera) | - 39,90 % | + 32,13 % |

Hinsichtlich subjektiver Kriterien wurde das System insgesamt positiv bewertet. Als Maßnahmen für die zukünftige Weiterentwicklung des Systems lässt sich ableiten, dass eine Einstellmöglichkeit für die Individualisierung der Informationsdarstellung im HMD vorgesehen werden sollte, da u. a. häufig in der realen Lagerumgebung vorkommende Farben die Wahrnehmung der virtuellen Information im HMD beeinflussen. Hierfür konnte eine Vorauswahl geeigneter Farben getroffen werden. Die Bewertung des im Demonstrator verwendeten HMDs und der Vergleich mit zwei weiteren HMDs hat gezeigt, dass das HMD noch eine Schwachstelle in der AR-unterstützten Kommissionierung darstellt. Von den Probanden wurde der Wunsch nach einem leichteren HMD und einer Kopfhalterung geäußert, die es ermöglicht, das HMD mittels eines einfachen Mechanismus so zu fixieren, dass es nicht verrutscht.

8 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung eines Konzeptes für die aktive Vermeidung von Kommissionierfehlern in der manuellen Kommissionierung basierend auf dem Augmented-Reality-unterstützten Kommissioniersystem Pick-by-Vision.

Zunächst wurden hierzu Untersuchungen zum Auftreten verschiedener Fehlerarten durchgeführt, sowie die Ursachen und Auswirkungen von Kommissionierfehlern ermittelt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass Kommissionierfehler schwerwiegende Folgen – angefangen von aufwendiger Nacharbeit bis hin zum Produktionsstillstand beim Kunden oder gar dem Verlust eines Kunden – nach sich ziehen können. Als zentrale Fehlerursache wird von den befragten Logistikleitern und Kommissionierern der Mensch genannt, der durch Unaufmerksamkeit oder den falschen Umgang mit technischen Hilfsmitteln maßgeblich zur Fehlerentstehung beiträgt. Als wesentliche Anforderung ist deshalb festzuhalten, dass ein System zur aktiven Fehlervermeidung zunächst den Nutzer möglichst intuitiv und schrittweise so durch den Prozess führen muss, wie dies bereits bei existierenden Pick-by-Vision Systemen umgesetzt ist. Durch den Einsatz eines zusätzlichen Prüfmechanismus auf Basis eines Ident- oder Trackingsystems soll es zudem ermöglicht werden, auftretende Fehler unmittelbar am Entstehungsort zu entdecken und zu beheben.

Für die technische Umsetzung des Prüfmechanismus und dessen Integration in ein Pick-by-Vision System wurden verschiedene Konzepte entwickelt, die den Anforderungen unterschiedlicher Einsatzszenarien für ein fehlersicheres Pick-by-Vision System gerecht werden. Ein kostengünstiges und für ein häufig in der Praxis vorkommendes Kommissionierszenario geeignetes Konzept basiert auf dem Einsatz einer in das Head-mounted Display integrierten Videokamera. Die Kamera kann sowohl als Sensor eines videobasierten Trackingsystems, beispielsweise für die Erfassung von Papiermarkern an Regalen, als auch für die Auswertung optischer Codes von Artikeln verwendet werden, indem der Kommissionierer diese einfach nach der Entnahme in das Sichtfeld hält. Durch die Überprüfung jeder einzelnen

Entnahmeeinheit ist ein solches Konzept theoretisch in der Lage, eine Annäherung an die Null-Fehler-Kommissionierung ermöglichen.

Zur Evaluierung der Einsatzfähigkeit dieses Konzeptes wurde ein Demonstrator realisiert. In mehreren Versuchsreihen mit Probanden, u. a. mit Kommissionierern von zwei Projektpartnern, konnten praxisnahe Erfahrungen zum Einsatz des Systems gewonnen werden. Die Ergebnisse der Probandenversuche zeigten, dass mit dem fehlersicheren Pick-by-Vision System die Fehlerquote um etwa 40 % gegenüber der klassischen Belegkommissionierung gesenkt werden kann.

Durch die Einbeziehung subjektiver Bewertungskriterien in die Tests, war es möglich, Aussagen zu ergonomischen und arbeitsphysiologischen Auswirkungen zu treffen. Dabei wurde das System überwiegend positiv bewertet und dem fehlersicheren Pick-by-Vision ein großes Zukunftspotenzial eingeräumt.

Weiterhin konnten durch die Bewertung der einzelnen Systemkomponenten unter subjektiven Gesichtspunkten Handlungsempfehlungen für die kontinuierliche Verbesserung von Pick-by-Vision Systemen abgeleitet werden. Insbesondere wurde das Head-mounted Display von den Probanden als Schwachstelle des Systems gesehen. Als Handlungsempfehlung für die Weiterentwicklung von Pick-by-Vision Systemen lässt sich festhalten, dass das Head-mounted Display einen höheren Tragekomfort, insbesondere ein niedrigeres Gewicht, aufweisen soll. Darüber hinaus soll eine Einstellmöglichkeit zur Individualisierung der virtuellen Informationsdarstellung vorgesehen werden.

8.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Manuelle Kommissioniersysteme sind aufgrund ihrer hohen Flexibilität in nahezu allen Branchen des produzierenden Gewerbes, des Handels und im Dienstleistungssektor zu finden. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen setzen prozentual mehr manuelle Systeme ein (52-74 %) als Großunternehmen (27-59 %) [Str-2005], da sie automatisierte und fehlerfreie Systeme selten rentabel nutzen können. Bereits im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ konnte das Potenzial eines AR-basierten Kommissioniersystems zur Unterstützung manueller Kommissioniertätigkeiten gezeigt werden. Eine spezielle Funktion zur Fehlervermeidung war dabei nicht vorgesehen. Da Kommissionierfehler eine Vielzahl negativer Auswirkungen haben – von zeitaufwendiger Nacharbeit der fehlerhaften Position bis hin zu einem Produk-

tionsausfall beim Kunden – unterhalten viele Unternehmen im Warenausgang Mitarbeiter, die die Versandeinheiten auf ihre Richtigkeit und Vollständigkeit hin überprüfen.

Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte fehlersichere Pick-by-Vision System ermöglicht ein aktives anstatt eines reaktiven Fehlermanagements und trägt somit zur Reduzierung der Kosten für die Fehlervermeidung bei, indem Überprüfungen nach dem eigentlichen Kommissionierprozess eingespart oder zumindest reduziert werden können. Darüber hinaus lässt sich auch der Aufwand für die Fehlerbehebung senken, da Fehler unmittelbar an ihrem Entstehungsort erkannt und behoben werden können. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann davon ausgegangen werden, dass 1 % mehr Kommissionierfehler 10 % höhere Kosten in der Auftragsabwicklung verursachen [Fis-1994]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass durch die Vermeidung von Fehlern Kosten signifikant reduziert werden können. Der zunächst höhere Investitionsaufwand für ein fehlersicheres Pick-by-Vision gegenüber beispielsweise der klassischen Belegkommissionierung sind also den Einsparmöglichkeiten bei der Fehlerüberprüfung und -behebung gegenüberzustellen. Dadurch stellt das fehlersichere Pick-by-Vision ein wirtschaftliches Hilfsmittel dar, das in einer Vielzahl von Unternehmen aller Branchen zur Reduktion von Kommissionierfehlern eingesetzt werden kann.

Indirekt kann die Einführung eines fehlersicheren Pick-by-Vision Systems in der manuellen Kommissionierung auch zur Weiterentwicklung existierender Produkte beitragen, indem ein Anstoß für weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der AR-Technologie gegeben wird. Die neu geschaffene Anwendung und die im Rahmen dieses Forschungsprojektes erarbeiteten Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung existierender AR-Komponenten, können die Basis für die Entwicklung neuer Produkte auf diesem Gebiet sein.

8.3 Ausblick

Durch das Forschungsprojekt „Pick-by-Vision II“ konnte das Potenzial eines mit einem Prüfmechanismus erweiterten Pick-by-Vision Systems hinsichtlich der Fehlervermeidung in der manuellen Kommissionierung aufgezeigt werden. Auf der Basis von Identifikations- und Trackingtechnologien wurden verschiedene Konzepte für die Realisierung des Prüfmechanismus entwickelt, die den Anforderungen unter-

schiedlicher Einsatzszenarien und Artikelspektren gerecht werden. Das als Demonstrator umgesetzte Konzept auf Basis einer im Head-mounted Display integrierten Kamera ermöglicht die Überprüfung sämtlicher Artikel, die mit einem optischen Code versehen sind. Allerdings kann dieses Konzept für Kleinteile, beispielsweise unverpackte Schrauben oder Dichtungsringe, nicht eingesetzt werden. Gegenstand weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit könnte die Entwicklung eines optischen Identifikationssystems sein, das unter anderem Kleinteile anhand der Form und Farbe erkennt. Ein innovativer Ansatz bestünde darin, auf Erkenntnisse aus den aktuellen Entwicklungen des markerless Trackings zurückzugreifen und diese so zu adaptieren, dass eine Lücke im Bereich der derzeit in der Logistik eingesetzten Identifikationsverfahren geschlossen werden kann.

Bei der Bewertung subjektiver Kriterien in Probandenversuchen mit dem Demonstrator konnten Schwachstellen von bisher am Markt verfügbaren Komponenten hinsichtlich des produktiven Einsatzes in der Kommissionierung identifiziert und Handlungsempfehlungen für deren Weiterentwicklung abgeleitet werden. Insbesondere der Tragekomfort von Head-mounted Displays sollte weiter verbessert werden, um ein System zu schaffen, das langfristig auch von den Nutzern akzeptiert wird. Pressemeldungen zufolge arbeiten mehrere Unternehmen an neuartigen Head-mounted Displays sowohl für den Consumermarkt als auch für den Industrieinsatz, um diese einer breiten Masse von Anwendern zugänglich zu machen. Für die kontinuierliche Verbesserung von Pick-by-Vision Systemen empfiehlt es sich, diese Entwicklungen in den Produktentwicklungsprozess miteinzubeziehen.

Literaturverzeichnis

- [3DC-2011] 3Dconnexion GmbH:
<http://www.3dconnexion.de/products/spacenavigator-for-notebooks.html>, Download: 26.06.2012.
- [adv-2011] Advanced realtime tracking GmbH (A.R.T.): Tracking. <http://www.ar-tracking.de/Tracking.35.0.html>, Download: 11.05.2011.
- [Alt-2003] Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. Dissertation. München: Technische Universität München, 2003.
- [Alt-2005] Alt, T.; Augmented Solutions GmbH, Deutschland: Markerloses Tracking System für Augmented Reality Anwendungen. Patentschrift DE102004061841A1, 2005.
- [Arn-2005] Arnold, D.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer, Berlin u.a.: 2003.
- [Arn-2009] Arnold D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Heidelberg, u.a.: 2009.
- [Asc-2004] Ascension Technology: Real-Time Motion Capture: MotionStar. http://www.ascension-tech.com/docs/products/motionstar_10_04.pdf, Download: 09.05.2011.
- [Azu-1997] Azuma, R. T.: A survey of Augmented Reality. In: Presence - Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (August 1997), S. 355-385.

- [Azu-2001] Azuma, R. T. et al.: Recent Advances in Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6) (2001) Nr. 11-12, S. 34-47.
- [Bor-2008] Born, G.: Das Netbook mit Linux. Pearson Deutschland GmbH, München 2008.
- [Bry-1995] Brynzér, H.; Johansson, M. I.: Design and performances of kitting and order picking systems. In: International Journal of production economics, (1995) Nr. 41, S. 115-125.
- [Ced-2012] Cedes GmbH: Lichtvorhang Object100, Fehlgriffe.
<http://www.handling.de/Lager-und-Logistik/Lager-und-Logistik---Lichtvorhang-Object100.htm>, Download: 23.02.2012.
- [Dat-2012] Datalogic S.p.A.: <http://www.servopack.de/support/DL/strichcode-fibel.pdf>, Download: 27.06.2012.
- [Div-2010] Divossen, R.: Vorlesung Virtuelle Realität und Augmented Reality: Kameratracking. http://www.uni-koblenz.de/~cg/ws0910/VRAR/07_kamera_tracking.pdf, Download: 13.06.2011.
- [Dre-2007] Drechsel, D.; Vetter, F.: Wäge-, Abfüll- und Verpackungsprozesse. Oldenbourg Industrieverlag, München u.a.: 2007.
- [Dul-2005] Dullinger, K.-H.: Das richtige Kommissionier-Konzept – eine klare Notwendigkeit. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2005. Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf: 2005, S. 194-198.
- [Fin-2002] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch : Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. Hanser, München u.a.: 2002.

- [Fin-2008] Finkenzeller, K.: RFID Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. Hanser, München: 2008.
- [Fis-1994] Fischer, J. H.: Zero-defect-picking. In: VDI-Berichte 1131. Deutscher Ingenieur-Verlag, Düsseldorf: 1994, S.11-22.
- [Fis-2007] Fischer, R.; Wagner, J.: RFID-Einsatz in der Baulogistik –Grundlagen & Praxisbeispiele. Vortrag zur Tagung: 1. Cluster-Treff Logistik Kompetenzteam Bauwirtschaft, München, 08. März 2007
- [fml-2011a] Simon, S.: Durchführung einer empirischen Studie zur Analyse von Kommissionierfehlern in der Praxis und Quantifizierung ihrer Fehlerkosten. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Ing. T. Rammelmeier. Abgegeben im März 2011.
- [fml-2011b] Vordermaier, F.: Machbarkeitsstudie zur Realisierung eines Augmented-Reality-unterstützten Kommissioniersystems, auf Basis optischen Trackings, zur aktiven Vermeidung von Kommissionierfehlern. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch Dipl.-Ing. T. Rammelmeier, Abgegeben im Dezember 2011.
- [Fri-2004] Friedrich, W. (Hrsg.): ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2004.
- [Gil-2008] Gillies, C.: Zeitenwende. In: Logistik inside, (2008) 09, S. 36-37.
- [Glä-2008] Gläser, M.; Kochsiek, M.: Massebestimmung. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim: 1997.

- [Gud-2005] Gudehus, T.: Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Springer, Berlin u.a.: 2005.
- [Gud-2007] Gudehus, T.: Logistik 2: Netzwerke, Systeme und Lieferketten. Springer, Berlin u.a.: 2007.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik: Grundlagen, Strategien, Anwendungen. Springer, Berlin u.a.: 2010
- [Gün-2009] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R.; Schedlbauer, M.: Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2009.
- [Gün-2011a] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik und Materialfluss Logistik. Technische Universität München: 2011.
- [Gün-2011b] Günthner, W.; Bormann, A.: Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter Ausführen. Springer, Berlin u.a.: 2011.
- [Gün-2011c] Günthner, W. A.; Wölfle, M.: Papierlose Produktion und Logistik. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2011.
- [Hah-2009] Hahndorf, M. O.: Die Zukunft der RFID-Technologie: Spannungsfeld zwischen Theorie und Praxis. IGEL Verlag, Hamburg: 2009.
- [Han-1990] Hansen, H.-G.; Lenk, B.: Codiertechnik: Der Schlüssel zum Strichcode. Ident Verlag, Neus, u.a.: 1990.

- [Hil-2004] Hille, A.: Hier spricht der Kommissionierer (Pick-by-Voice). In: DVZ-Deutsche Logistikzeitung, (2004) Nr.018
- [Hit-2007] Hitz, M.; Melcher, R.: AIM'07 Alternative Interaktionsmechanismen. http://www.uni-klu.ac.at/tewi/downloads/AIM07_Proceedings.pdf, Download: 22.05.2011.
- [Hof-2011] Hoffmeyer, A.: Integration komplexer dynamischer Systeme in Augmented Reality-Anwendungen in der Automobilindustrie. In: Schenk, M.: Digitales Engineering und virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, 14. IFF-Wissenschaftstage, 28. – 30. Juni 2011.
- [Höh-2008] Höhl, W.: Interaktive Ambiente mit Open-Source-Software: 3D-Walk-Throughs und Augmented Reality für Architekten mit Blender 2.43, DART 3.0 und ARToolKit 2.72. Springer, Wien: 2008.
- [Ide-2012] identWERK GmbH: Pick-by-Weight, Fehlerfreie Kommissionierung – „Grammgenau“. <http://www.identware.de/html/download/Identwerk%20TecSheet-PickbyWeight.pdf>, Download: 26.06.2012.
- [IIS-2011] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS): Inertialsensorik. <http://www.iis.fraunhofer.de/bf/In/technologie/ins/ins.jsp>, Download: 09.05.2011.
- [iMa-2011] iMAR, Gesellschaft für Inertiale Mess-, Automatisierungs- und Regelsysteme mbH: Trace RT-F200. http://www.imar-navigation.de/downloads/TraceRT-F200_de.pdf, Download: 09.05.2011.
- [Ine-2004] I-networx: GSM Handy Ortung. <http://ortung.i-networx.de/gsm-ortung.htm>, Download: 10.05.2011.

- [INI-2011] INITION, England: Logitech Head Tracker.
http://www.inition.co.uk/inition/dispatcher.php?action=get&model=products&URL_=product_mocaptrack_logitech_ht&SubCatID_=21&tab=blurb, Download: 08.05.2011.
- [Jel-2012] Jelassi, M.; Sahin, H.;; Augmented Reality beim Militär.
http://winfwiki.wifom.de/index.php/Augmented_Reality_beim_Milit%C3%A4r, Download: 26.06.2012.
- [Jod-2005] Jodin, D.; Ten Hompel, M.: Sortier- Und Verteilsysteme. Springer, Berlin Heidelberg New York u.a.: 2005.
- [Jün-2000] Jünemann, R.; Schmidt, T.: Materialflußsysteme: Systemtechnische Grundlagen. Springer, Berlin u.a.: 2000
- [Kai-2004] Kain, S.: Mikromechanische Inertialsensoren.
http://www.leb.eei.unierlangen.de/termine/ferienakademie/2008/mikrosysteme/Kain_Inertialsensoren_Zusammenfassung.pdf, Download: 09.05.2011.
- [Ker-2007] Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. Springer, Berlin 2007.
- [kid-2011] KidSpotter: Main Page. <http://kidspotter.com/>, Download: 10.05.2011.
- [Kuh-2012] Kuhlmann, U.; Unruh, V.: Wägetechnik in logistischen Prozessen.
<http://www.mm-logistik.vogel.de/lagertechnik/articles/252051>, Download: 19.06.2012.

- [KUK-2011] KUKA Roboter GmbH: Occubot.<http://www.kuka-robotics.com/de/products/systems/occubot/start.htm>, Download: 08.05.2011.
- [Leh-2001] Lehmann, S.; Reischl, M.: Hybrides Tracking. http://www.pt-it.pt-dlr.de/_media/08_lehmann.pdf, Download: 11.05.2011
- [Lol-2003] Lolling, A.: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten. Dissertation. Dortmund: Universität Dortmund, 2003.
- [Lün-2002] Lüning, R.: Kommissionieranlagen - Erfahrungen und Trends aus Sicht der Betreiber. In: Fördern und Heben, (2002) Nr. 5, S. 296-298.
- [Lün-2005] Lüning, R.: Beitrag zur optimierten Gestaltung des Durchsatzes in Kommissioniersystemen für Stückgüter. In: Tagungsband zum 22. Deutschen Logistikkongress 2005 (Hrsg.): Bundesvereinigung Logistik, Berlin, 19.-21. Oktober 2005
- [Mag-2011] MagicMap: Ein System zur kooperativen Positionsbestimmung über WLAN – Anwendungen.
<http://www2.informatik.hu-berlin.de/rok/MagicMap/anwendungen.htm>, Download: 11.05.2011.
- [Man-2011] Manoli, Y.: MEMS-Inertialsensoren. http://www.ama-weiterbildung.de/fileadmin/Bildupload/Seminare/pdf/AMA_SemFly_Inertial_web_2011-0406.pdf, Download: 09.05.2011.
- [Mar-2006] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg, Wiesbaden: 2006.
- [Mec-2000] Menache; A.: Understanding Motion Capture for Computer Animation and Video Games. Morgan Kaufmann, San Diego 2000.

- [met-2011a] Metaio GmbH: FAQ. <http://www.metaio.de/faq/>, Download: 12.05.2011.
- [Mil-1994] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Das, H. (Hrsg.): SPIE Vol. 2351, Telem manipulator and Telepresence Technologies, Boston, 31. Oktober bis 1. November 1994.
- [Mil-1999] Milgram, P.; Colquhoun Jr., H.: A taxonomy of real and virtual world display integration. In: Otha, Y.; Tamura, H. (Hrsg.): Mixed Reality: Merging real and virtual worlds. Ohmsha, Tokyo, 1999, S. 1-16.
- [Mnr-2011] Marner, M. R.; Smith, R. T.; Porter, S. R. et al.: Large Scale Spatial Augmented Reality for Design and Prototyping. In: Furht, B. (Hrsg.): Handbook of Augmented Reality. Springer, New York u.a.: 2011
- [Muc-2008] Mucha, M.; Müller, M.: RFID für den Mittelstand: Erfolgreiche Beispiele aus der Praxis.
http://www.rfidatlas.de/images/stories/RFID_DOCS/ecc_rfid_pb_mittelstand_screen.pdf, Download: 11.05.2011.
- [New-2003] NewTec GmbH: Funkgesteuerte Pick-to-Light-Anlage optimiert Kommissionierung. In: Logistik für Unternehmen, (2003) Nr. 10, S. 60-61.
- [Pat-2004] Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Forschungsbericht und zugleich Dissertation. München: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften Technische Universität München, 2004.
- [Pro-1994] Profos, P.; Pfeifer, T.: Handbuch der industriellen Meßtechnik. Oldenbourg Industrieverlag, München 1994.

- [Reg-2007] Regenbrecht, H.: Industrial Augmented Reality Applications. In: Haller, M.; Billinghurst, M.; Thomas, B.: Emerging Technologies of Augmented Reality Interfaces and Design. Idea Group, Hershey, London, 2007, S. 283-304.
- [Rei-2009] Reif, R. : Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems. Dissertation. München: Technische Universität München. 2009.
- [Ret-2011] Reitmayr, G.; Drummond, T.: Going Out: Robust Hybrid Tracking for Outdoor Augmented Reality.
<http://mi.eng.cam.ac.uk/~gr281/docs/ReitmayrIsmar06GoingOutPresentation.pdf>, Download: 11.05.2011.
- [RFI-2011] RFID Support Center: Grundlagen RFID.
http://www.rfidsupportcenter.de/index.php?mySID=6e08b6b1af42643fae719bc39a25f51a&cat_id=2998&show=2998&hide=3005, Download: 11.05.2011.
- [Sas-2008] Saske, B.: Augmented Reality in der Instandhaltung. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 2008.
- [Scu-2001] Schulte, G.: Material- und Logistikmanagement. Oldenbourg Verlag, München, Wien, Oldenbourg: 2001.
- [Scw-2009] Schwerdtfeger, B.: Pick-by-vision bringing HMD-based augmented reality into the warehouse. Dissertation. München: Technische Universität München. 2009.
- [Scw-2011] Schwerdtfeger, B.; Klinker, G.: AVILUS Tracking Contest 2010 Abschlussbericht.
<http://ar.in.tum.de/Chair/PublicationDetail?pub=schwerdtfeger2010TrackingContest>, Download: 14.06.2011.

- [Sen-2006] SensAble Technologies, Inc.: FreeForm® Modeling™ u. FreeForm® Modeling Plus.
http://www.sensable.com/documents/documents/datasheet_FFM_FFMPv9_German_HiRes.pdf, Download: 08.05.2011.
- [Sen-2009] Schenk, M.; Grubert, J.; Sauer, S.; et al.: Augmented Reality basierte Werkerassistenz. In: Schenk M. (Hrsg.): Digital Engineering - Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation. GITO, Berlin: 2009. S. 341-360
- [Sic-2012] Sick AG: Sicherheits-Laserscanner.
http://www.sick.com/group/DE/home/products/product_portfolio/optoelectronic_protective_devices/Seiten/safety_laser_scanners.aspx ,
Download: 24.06.2012.
- [Spe-2004] Spee, D.: Effiziente Kommissionierung mit WMS. Vortrag zur Tagung: Warehouse Management Systems, Management Circle, Bad Homburg, 6. und 7. September 2004.
- [Str-2005] Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Günthner, W. A.; Dangelmaier, W.: Trends und Strategien in der Logistik – Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010. Deutscher Verkehrsverlag, Bremen: 2005.
- [Str-2009] Straube, F.: RFID in der Logistik - Empfehlungen für eine erfolgreiche Einführung. Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin, Berlin 2009.
- [Str-2011] Strickland, J.: How Virtual Reality Gear Works.
<http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/other-gadgets/VR-gear6.htm>, Download: 08.05.2011.
- [Swa-2012] Schwald, O.: Business V10. Verlagsgruppe Holtzbrinck, Berlin: 2012.

- [Tam-2010] Tamm, G., Tribowski, C.: Informatik im Fokus, RFID. Springer, Berlin u.a.: 2010.
- [Ten-2005] ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer, Berlin: 2005.
- [Ten-2010] Ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management: Organisation Und Steuerung Von Lager- Und Kommissioniersystemen. Springer, Berlin u.a.: 2010.
- [tex-2011] teXXmo Mobile Solution GmbH & Co. KG:
Datenblatt teXXmo One. 2011.
- [ThK-2011] Thomas Kind GmbH, Deutschland: Assy-Control.
<http://www.thomaskind.de/arbeitsplatzsysteme-assy-control.pdf>,
Download: 08.05.2011.
- [Tön-2010] Tönnis, M.: Augmented Reality: Einblicke in die Erweiterte Realität. Springer, Berlin u.a.: 2010.
- [Tri-2011] Trivisio Prototyping GmbH:Trivisio – M3 Cam.
<http://www.trivisio.com/index.php/products/hmdnte/m3-cam>, Download am: 26.06.2012.
- [Tüm-2009] Tümmler, J.: Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz mobiler augmented reality Systeme in industriellen Anwendungen. Dissertation. Magdeburg: Universität Magdeburg. 2009.
- [VDI3311] VDI 3311:1998: Beleglose Kommissioniersysteme. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Düsseldorf: Beuth.

- [VDI3590] VDI 3590:1994: Blatt 1: Kommissioniersysteme – Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Düsseldorf: Beuth.
- [Vog-1997] Vogt, G.: Das neue Kommissionierhandbuch. Verlag moderne Industrie, Landsberg: 1997.
- [Vol-2003] Volkswagen AG: Schlussbericht zum Leitprojekt ARVIKA.

<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/486098710.pdf>,
Download: 06.03.2012.
- [Wap-2006] Wappis, J.; Jung, B.; Brunner, F.: Null-Fehler-Management, Umsetzung von Six Sigma. Hanser, München u.a.: 2006.
- [Wei-2004] Weineck, J.: Sportbiologie. Spitta-Verlag, Balingen u.a.: 2004.
- [Wen-2011] Wenglor Sensoric GmbH: Fehler vermeiden. In: f+h, Jg. 316 (2011) Nr. 8, S. 491.
- [Wol-2012] Wolf, O.; Rahn, J.; Haselberger, J.: Warehouse-Management-System aus der Wolke. In: Fördern und Heben, (2012) Nr. 3, S. 54-55.
- [Wot-2012] Wolter, M.: Mit patentierter Lösung zur Marktführerschaft. Vortrag zur Tagung: Patent in Bayern - Patentstrategien für den Mittelstand, München, 16.05.2012.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-1: Reality-Virtuality-Kontinuum (vgl. [Gün-2011c] nach [Mil-1994]) | 7 |
| Abbildung 2-2: Komponenten eines Augmented-Reality-Systems [Rei-2009] | 9 |
| Abbildung 2-3: Allgemeiner Kommissionierprozess [Gün-2009] | 14 |
| Abbildung 2-4: Pick-by-Vision System (Bildquelle: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München) | 27 |
| Abbildung 3-1: Ursachen von Mengenfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a]) | 33 |
| Abbildung 3-2: Ursachen von Typfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a]) | 35 |
| Abbildung 3-3: Ursachen von Auslassungsfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a]) | 37 |
| Abbildung 3-4: Ursachen von Zustandsfehlern (in Anlehnung an [fml-2011a]) | 39 |
| Abbildung 3-5: Fehlerquote unterschiedlicher Kommissioniertechnologien | 41 |
| Abbildung 3-6: Anteile der Fehlerarten bei der Belegkommissionierung und bei Pick-by-Light | 42 |
| Abbildung 4-1: Übergeordnete Anforderungen an ein fehlersicheres Pick-by- Vision System | 48 |
| Abbildung 5-1: Vergleich von aktiven und reaktiven Maßnahmen der Fehlervermeidung | 51 |
| Abbildung 5-2: Modell-Szenario für die Entwicklung eines Mechanismus zur Fehlervermeidung | 52 |
| Abbildung 5-3: Physikalische Grundstruktur der Identifikationstechnik [Gün- 2011a] | 56 |
| Abbildung 5-4: Konzept 1 (Lichtvorhang vor Regal) | 74 |
| Abbildung 5-5: Konzept 2 (Waage auf Kommissionierwagen) | 76 |
| Abbildung 5-6: Konzept 3 (RFID-Handschuh) | 79 |
| Abbildung 5-7: RFID-Handschuh [Gün-2011c] | 79 |
| Abbildung 5-8: Konzept 4 (Kommissionierwagen mit Identsystem) | 81 |
| Abbildung 5-9: Variante des Konzeptes 4 mit Videokamera zur Erfassung optischer Codes | 83 |
| Abbildung 5-10: Konzept 5 (IR-Tracking der Hand bzw. des Unterarms) | 84 |
| Abbildung 5-11: Target am Handgelenk des Nutzers zur Interaktion in einer VR- Umgebung (links) und in der AR-unterstützten Kommissionierung (rechts) | 85 |
| Abbildung 5-12: Konzept 6 (Mobiles IR-Tracking auf Kommissionierwagen) | 87 |
| Abbildung 5-13: Konzept 7 (Kopfbasierte Kamera) | 88 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5-14: Systemaufbau und Vorgehensweise bei der Fehlerüberprüfung mittels kopfbasierter Kamera | 89 |
| Abbildung 6-1: Komponenten des Demonstrators | 94 |
| Abbildung 6-2: Head-mounted Display des Demonstrators | 96 |
| Abbildung 6-3: Mobiler Rechner des Demonstrators (Bildquelle: teXXmo Mobile Solution GmbH & Co. KG) | 97 |
| Abbildung 6-4: Dreh-Drückknopf zur Interaktion mit dem Demonstrator | 99 |
| Abbildung 6-5: Interaktionskonzept des Demonstrators (in Anlehnung an [fml-2011b]) | 101 |
| Abbildung 6-6: Lagernavigation innerhalb einer Gasse [fml-2011b] | 103 |
| Abbildung 6-7: Fehlerüberprüfung aus der Perspektive des Kommissionierers | 104 |
| Abbildung 6-8: Eingrenzung des Raums zur Fehlerüberprüfung (in Anlehnung an [fml-2011b]) | 105 |
| Abbildung 7-1: Versuchsumgebung für die Probandenversuche (in Anlehnung an [Gün-2009]) | 110 |
| Abbildung 7-2: Tool zur Auswahl der Farbdarstellung im HMD | 114 |
| Abbildung 7-3: Fehlerquote in Abhängigkeit von der verwendeten Technik mit und ohne systematische Fehler im Laborversuch | 118 |
| Abbildung 7-4: Fehlerarten je Technik im Laborversuch | 119 |
| Abbildung 7-5: Fehlerquote in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur im Laborversuch | 120 |
| Abbildung 7-6: Fehlerquote in Abhängigkeit von der Technikreihenfolge im Laborversuch | 121 |
| Abbildung 7-7: Einfluss der Kommissionier- und 3D-Erfahrung auf die Fehlerquote im Laborversuch | 121 |
| Abbildung 7-8: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der verwendeten Technik im Laborversuch | 122 |
| Abbildung 7-9: Pickleistung in Abhängigkeit von der Auftragsstruktur im Laborversuch | 123 |
| Abbildung 7-10: Einfluss von Lerneffekten auf die Kommissionierzeit im Laborversuch | 123 |
| Abbildung 7-11: Einfluss der Kommissionier- und 3D-Erfahrung auf die Kommissionierzeit im Laborversuch | 124 |
| Abbildung 7-12: Akzeptanz der Kommissioniersysteme im Laborversuch | 125 |
| Abbildung 7-13: Bewertung des Potenzials zur Fehlervermeidung im Laborversuch | 126 |
| Abbildung 7-14: Bewertung der Beanspruchung im Laborversuch | 126 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 7-15: Bewertung der Erlernbarkeit und der Interaktion im Laborversuch | 127 |
| Abbildung 7-16: Bewertung des Trage-/Bedienkomforts im Laborversuch | 128 |
| Abbildung 7-17: Bewertung einzelner Systemkomponenten im Laborversuch | 129 |
| Abbildung 7-18: Ergebnisse der Befragung zur Farbauswahl im Laborversuch | 130 |
| Abbildung 7-19: Bewertung unterschiedlicher HMD-Konzepte im Rahmen des Laborversuchs | 131 |
| Abbildung 7-20: Einfluss der Kommissioniertechnik auf die Fehlerquote im Praxisversuch | 133 |
| Abbildung 7-21: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der verwendeten Technik im Praxisversuch | 134 |
| Abbildung 7-22: Bewertung der Beanspruchung im Praxisversuch | 135 |
| Abbildung 7-23: Vergleich verschiedener HMD-Konzepte im Rahmen des Praxisversuchs | 136 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 2-1: Pickleistung unterschiedlicher Kommissioniersysteme (in Anlehnung an [Jün-2000]) | 17 |
| Tabelle 2-2: Fehlerquote verschiedener Kommissioniersysteme [Lol-2003] | 20 |
| Tabelle 2-3: Arten der Informationsbereitstellung in der Kommissionierung (in Anlehnung an [Gün-2011a]) | 21 |
| Tabelle 5-1: Eigenschaften der Frequenzbereiche von RFID-Systemen [Gün-2011c] | 62 |
| Tabelle 5-2: Übersicht vorausgewählter Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung | 91 |
| Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Nutzwertanalyse zur Auswahl geeigneter Konzepte für die Funktion der Fehlervermeidung | 93 |
| Tabelle 6-1: Gewicht der Komponenten des Wearable PCs | 98 |
| Tabelle 7-1: Übersicht der HMDs | 115 |
| Tabelle 7-2: Auftragsstruktur bei den Probandenversuchen | 116 |
| Tabelle 7-3: Probandenstruktur bei der Evaluation im Labortest | 116 |
| Tabelle 7-4: Probandenstruktur bei der Evaluation im Praxistest | 132 |
| Tabelle 7-5: Vergleich unterschiedlicher Pick-by-Vision Systeme hinsichtlich logistischer Kennzahlen | 138 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----|-----------------------------------------|
| 2D | zweidimensional |
| 3D | Dreidimensional |
| AP | Arbeitspaket |
| AR | Augmented Reality |
| AV | Augmented Virtuality |
| CAD | Computer-aided Design |
| CCD | Charge-coupled Device |
| EPC | elektronischer Produktcode |
| GPS | Global Positioning System |
| GSM | Global System for Mobile Communications |
| HF | High-Frequency |
| HMD | Head-mounted Display |
| IGF | Industrielle Gemeinschaftsforschung |
| IR | Infrarot |
| KLT | Kleinladungsträger |
| LF | Low-Frequency |
| MDT | Mobiles Datenterminal |
| MM | Mannmonat |
| MzW | Mann-zur-Ware |
| PA | Projektbegleitender Ausschuss |

| | |
|------|--------------------------------|
| PbL | Pick-by-Light |
| PbV | Pick-by-Voice |
| PbVi | Pick-by-Vision |
| PC | Personal Computer |
| RFID | Radio Frequency Identification |
| SHF | Super-High-Frequency |
| UHF | Ultra-High-Frequency |
| USB | Universal Serial Bus |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VR | Virtual Reality |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WMS | Warehouse Management System |
| XML | Extensible Markup Language |

Konzeptbewertung - Szenario 2 (kleines Schnelldreherlager)

| Kriterium | Gewichtung | Konzept 1 | | Konzept 2 | | Konzept 3 | | Konzept 4 | | Konzept 5 | | Konzept 6 | | Konzept 7 | |
|-----------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte |
| 1 Fehlererkennung bei der Entnahme | 0,144 | 5 | 0,72 | 5 | 0,65 | 5 | 0,72 | 7 | 0,98 | 5 | 0,72 | 5 | 0,72 | 8 | 1,16 |
| 1.1 Typfehler | 0,250 | 8 | 2,00 | 4 | 1,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 10 | 2,50 |
| 1.2 Mengenfehler | 0,250 | 2 | 0,50 | 7 | 1,75 | 2 | 0,50 | 8 | 2,00 | 2 | 0,50 | 2 | 0,50 | 10 | 2,50 |
| 1.3 Auslassungsfehler | 0,250 | 10 | 2,50 | 7 | 1,75 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 |
| 1.4 Zustandsfehler | 0,250 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 1 | 0,25 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 2 | 0,50 |
| 2 Fehlererkennung bei der Ablage | 0,094 | 8 | 0,76 | 10 | 0,94 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 0 | 0,00 |
| 3 Kommissionierleistung | 0,100 | 9 | 0,95 | 8 | 0,80 | 9 | 0,85 | 9 | 0,75 | 9 | 0,85 | 8 | 0,80 | 7 | 0,70 |
| 3.1 Handlingaufwand | 0,500 | 9 | 4,50 | 10 | 5,00 | 9 | 4,50 | 6 | 3,00 | 8 | 4,00 | 7 | 3,50 | 9 | 4,50 |
| 3.2 Latenzzeit | 0,500 | 10 | 5,00 | 6 | 3,00 | 8 | 4,00 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 |
| 4 Kosten | 0,094 | 5 | 0,43 | 6 | 0,57 | 6 | 0,57 | 6 | 0,57 | 4 | 0,33 | 5 | 0,43 | 10 | 0,90 |
| 4.1 Investitionsaufwand | 0,500 | 4 | 2,00 | 7 | 3,50 | 7 | 3,50 | 7 | 3,50 | 4 | 2,00 | 4 | 2,00 | 10 | 5,00 |
| 4.2 Laufende Kosten | 0,500 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 3 | 1,50 | 3 | 1,50 | 9 | 4,50 |
| 5 Ergonomie | 0,094 | 10 | 0,91 | 9 | 0,83 | 6 | 0,54 | 9 | 0,80 | 7 | 0,61 | 6 | 0,52 | 9 | 0,82 |
| 5.1 Gewicht | 0,333 | 10 | 3,33 | 8 | 2,67 | 5 | 1,67 | 8 | 2,67 | 7 | 2,33 | 6 | 2,00 | 9 | 3,00 |
| 5.2 Bewegungsfreiheit | 0,333 | 10 | 3,33 | 10 | 3,33 | 4 | 1,33 | 8 | 3,00 | 4 | 1,33 | 4 | 1,33 | 8 | 2,67 |
| 5.3 Bedienbarkeit | 0,167 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 8 | 1,33 | 8 | 1,33 | 9 | 1,50 | 7 | 1,17 | 9 | 1,50 |
| 5.4 Erlernbarkeit | 0,167 | 9 | 1,50 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 8 | 1,33 | 9 | 1,50 |
| 6 Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen | 0,111 | 5 | 0,59 | 8 | 0,85 | 9 | 1,04 | 5 | 0,59 | 5 | 0,52 | 4 | 0,41 | 6 | 0,63 |
| 6.1 Robustheit gegenüber mechanischer Beanspruchung | 0,333 | 7 | 2,33 | 4 | 1,33 | 8 | 2,67 | 6 | 2,00 | 6 | 2,00 | 4 | 1,33 | 7 | 2,33 |
| 6.2 Robustheit gegenüber Verschmutzung | 0,333 | 5 | 1,67 | 9 | 3,00 | 10 | 3,33 | 5 | 1,67 | 4 | 1,33 | 4 | 1,33 | 5 | 1,67 |
| 6.3 Unabhängigkeit von Lichtverhältnissen | 0,333 | 4 | 1,33 | 10 | 3,33 | 10 | 3,33 | 5 | 1,67 | 4 | 1,33 | 3 | 1,00 | 5 | 1,67 |
| 7 Flexibilität | 0,089 | 6 | 0,49 | 10 | 0,84 | 10 | 0,84 | 10 | 0,84 | 8 | 0,67 | 8 | 0,67 | 9 | 0,76 |
| 7.1 Skalierbarkeit | 0,500 | 8 | 4,00 | 10 | 5,00 | 10 | 5,00 | 10 | 5,00 | 8 | 4,00 | 6 | 4,50 | 10 | 5,00 |
| 7.2 Aufwand bei Änderungen | 0,500 | 3 | 1,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 7 | 3,50 | 3 | 1,50 | 7 | 3,50 |
| 8 Eignung für mehrere Kommissionierer | 0,067 | 2 | 0,13 | 10 | 0,67 | 7 | 0,47 | 10 | 0,67 | 7 | 0,47 | 4 | 0,27 | 10 | 0,67 |
| 9 Unterstützung der optischen Wegfindung | 0,083 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 10 | 0,83 | 10 | 0,83 |
| 10 Arbeitssicherheit | 0,122 | 10 | 1,22 | 10 | 1,22 | 5 | 0,61 | 10 | 1,22 | 5 | 0,61 | 5 | 0,61 | 10 | 1,22 |
| Summe | 1,00 | 60 | 6,20 | 75 | 7,38 | 64 | 6,39 | 72 | 7,18 | 66 | 6,37 | 60 | 5,87 | 77 | 7,68 |

| Konzeptbewertung - Szenario 3 (großes Kommissionierlager) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Kriterium | Gewichtung | Konzept 1 | | Konzept 2 | | Konzept 3 | | Konzept 4 | | Konzept 5 | | Konzept 6 | | Konzept 7 | |
| | | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte | Punkte | gew. Punkte |
| 1 Fehlererkennung bei der Entnahme | 0,144 | 5 | 0,72 | 4 | 0,61 | 5 | 0,72 | 7 | 0,98 | 5 | 0,72 | 5 | 0,72 | 7 | 1,05 |
| 1.1 Typfehler | 0,250 | 8 | 2,00 | 3 | 0,75 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,00 | 8 | 2,25 |
| 1.2 Mengenfehler | 0,250 | 2 | 0,50 | 7 | 1,75 | 2 | 0,50 | 8 | 2,00 | 2 | 0,50 | 2 | 0,50 | 9 | 2,25 |
| 1.3 Auslassungsfehler | 0,250 | 10 | 2,50 | 7 | 1,75 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 10 | 2,50 | 9 | 2,25 |
| 1.4 Zustandsfehler | 0,250 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 1 | 0,25 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 2 | 0,50 |
| 2 Fehlererkennung bei der Ablage | 0,094 | 8 | 0,76 | 10 | 0,94 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 8 | 0,76 | 0 | 0,00 |
| 3 Kommissionierleistung | 0,100 | 10 | 0,95 | 8 | 0,80 | 9 | 0,85 | 8 | 0,75 | 9 | 0,85 | 8 | 0,75 | 7 | 0,70 |
| 3.1 Handlingsaufwand | 0,500 | 9 | 4,50 | 10 | 5,00 | 9 | 4,50 | 6 | 3,00 | 8 | 4,00 | 7 | 3,50 | 9 | 4,50 |
| 3.2 Latenzzeit | 0,500 | 10 | 5,00 | 6 | 3,00 | 8 | 4,00 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 |
| 4 Kosten | 0,094 | 4 | 0,33 | 6 | 0,57 | 6 | 0,57 | 6 | 0,57 | 2 | 0,19 | 4 | 0,38 | 10 | 0,90 |
| 4.1 Investitionsaufwand | 0,500 | 2 | 1,00 | 7 | 3,50 | 7 | 3,50 | 7 | 3,50 | 1 | 0,50 | 5 | 2,50 | 10 | 5,00 |
| 4.2 Laufende Kosten | 0,500 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 5 | 2,50 | 3 | 1,50 | 3 | 1,50 | 9 | 4,50 |
| 5 Ergonomie | 0,094 | 10 | 0,91 | 9 | 0,83 | 6 | 0,54 | 9 | 0,80 | 7 | 0,67 | 6 | 0,52 | 9 | 0,82 |
| 5.1 Gewicht | 0,333 | 10 | 3,33 | 8 | 2,67 | 5 | 1,67 | 8 | 2,67 | 8 | 2,67 | 6 | 2,00 | 9 | 3,00 |
| 5.2 Bewegungsfreiheit | 0,333 | 10 | 3,33 | 10 | 3,33 | 4 | 1,33 | 9 | 3,00 | 4 | 1,33 | 4 | 1,33 | 8 | 2,67 |
| 5.3 Bedienbarkeit | 0,167 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 8 | 1,33 | 8 | 1,33 | 9 | 1,50 | 7 | 1,17 | 9 | 1,50 |
| 5.4 Erfornbarkeit | 0,167 | 9 | 1,50 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 9 | 1,50 | 8 | 1,33 | 6 | 1,00 | 9 | 1,50 |
| 6 Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen | 0,111 | 5 | 0,59 | 8 | 0,85 | 9 | 1,04 | 5 | 0,59 | 5 | 0,52 | 4 | 0,41 | 6 | 0,63 |
| 6.1 Robustheit gegenüber mechanischer Beanspruchung | 0,333 | 7 | 2,33 | 4 | 1,33 | 8 | 2,67 | 6 | 2,00 | 6 | 2,00 | 4 | 1,33 | 7 | 2,33 |
| 6.2 Robustheit gegenüber Verschmutzung | 0,333 | 5 | 1,67 | 9 | 3,00 | 10 | 3,33 | 5 | 1,67 | 4 | 1,33 | 4 | 1,33 | 5 | 1,67 |
| 6.3 Unabhängigkeit von Lichtverhältnissen | 0,333 | 4 | 1,33 | 10 | 3,33 | 10 | 3,33 | 5 | 1,67 | 4 | 1,33 | 3 | 1,00 | 5 | 1,67 |
| 7 Flexibilität | 0,089 | 6 | 0,49 | 10 | 0,84 | 10 | 0,84 | 10 | 0,84 | 8 | 0,67 | 6 | 0,53 | 9 | 0,76 |
| 7.1 Skalierbarkeit | 0,500 | 8 | 4,00 | 10 | 5,00 | 10 | 5,00 | 10 | 5,00 | 8 | 4,00 | 9 | 4,50 | 10 | 5,00 |
| 7.2 Aufwand bei Änderungen | 0,500 | 3 | 1,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 9 | 4,50 | 7 | 3,50 | 3 | 1,50 | 7 | 3,50 |
| 8 Eignung für mehrere Kommissionierer | 0,067 | 2 | 0,13 | 10 | 0,67 | 7 | 0,47 | 10 | 0,67 | 7 | 0,47 | 4 | 0,27 | 10 | 0,67 |
| 9 Unterstützung der optischen Wegfindung | 0,083 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 0 | 0,00 | 10 | 0,83 |
| 10 Arbeitssicherheit | 0,122 | 10 | 1,22 | 10 | 1,22 | 5 | 0,61 | 10 | 1,22 | 5 | 0,61 | 5 | 0,61 | 10 | 1,22 |
| Summe | 1,00 | 59 | 6,11 | 74 | 7,34 | 64 | 6,39 | 72 | 7,18 | 64 | 6,23 | 59 | 5,93 | 77 | 7,57 |

Anhang B Kommissionierliste für die Probandenversuche



Kommissionierauftrag

Auftrag Nr.: 5

Seite: 1 von 1

| Pos | Lagerplatz | Artikelnummer | Menge | Quittierung |
|-----|------------|---------------|-------|--------------------------|
| 1 | 1 - A - 05 | 0903840 | 2 | <input type="checkbox"/> |
| 2 | 1 - C - 07 | 520914830 | 2 | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 2 - E - 07 | 0096840 | 1 | <input type="checkbox"/> |
| 4 | 1 - A - 14 | 570810100A | 3 | <input type="checkbox"/> |
| 5 | 3 - C - 12 | F0010 | 3 | <input type="checkbox"/> |
| 6 | 4 - D - 07 | 0096640 | 1 | <input type="checkbox"/> |

Kommissioniert am:

Unterschrift:

Anhang C Fragebögen für die Probandenversuche



Fragebogen zur Evaluierung eines Augmented Reality gestützten Kommissioniersystems mit einer Erweiterung zur Fehlervermeidung

Sehr geehrte Damen und Herren,

Ziel der Versuchsreihe ist es zu prüfen, ob die zu testenden Systeme einen Fortschritt in der
Kommissioniertechnologie bedeuten.

Es soll dabei nicht Ihre Leistung überprüft werden, sondern es interessieren Ihre Erfahrungen
und Meinung zu der von Ihnen verwendeten Technik. Die Auswertung des Fragebogens
erfolgt völlig anonym. Uns würde es sehr helfen, wenn Sie die Fragen so umfassend und
ehrlich wie möglich beantworten. Vielen Dank.

Ihr Team des Lehrstuhls fml

Angaben zur Person

1. Probandennummer: _____
2. Alter: _____
3. Geschlecht: männlich weiblich
4. Muttersprache: _____
5. Höchster erreichter Bildungsabschluss:

6. Derzeitige Tätigkeit:

7. Benötigen Sie normalerweise eine Sehhilfe?
 ja, Brille ja, Kontaktlinsen nein
wenn ja, welche Fehlsichtigkeit liegt vor?
Linkes Auge: _____ (Dioptrien)
Rechtes Auge: _____ (Dioptrien)



Probandennummer: _____

Angaben zur Kommissioniererfahrung

Haben Sie Erfahrung im Bereich der Kommissionierung?

- keine Erfahrung etwas Erfahrung langjährige/große Erfahrung

wenn ja, mit welchen Technologien?

- Kommissionierliste Pick-by-Voice Pick-by-Light

sonstige: _____

Angaben zur 3D-Erfahrung

Haben Sie Erfahrung im Bereich Virtual / Augmented Reality?

- keine Erfahrung etwas Erfahrung langjährige/große Erfahrung

wenn ja, mit welchen Technologien?

- 3D-Visualisierung 3D-Computerspiele Datenbrillen

sonstige: _____



Fragebogen zu Technik: Pick by Vision II mit Bilderkennung

Probandennummer: _____

Wurde während des Versuches eine Sehhilfe getragen?

ja, Brille ja, Kontaktlinsen nein

| | Stimmt über- haupt nicht | Stimmt weit- gehend nicht | Stimmt eher nicht | Stimmt ein- wenig | Stimmt weit- gehend | Stimmt genau |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Die Steuerung des Systems war eindeutig. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Handhabung war einfach zu lernen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Der Einsatz dieser Technologie war für das Kommissionieren hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System zeichnet sich durch seine Übersichtlichkeit aus. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung empfehlen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hilft, Fehler zu vermeiden. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Handhabung im Fehlerfall war umständlich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hat meine Eingaben immer sofort erkannt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Durch das Einblenden der Daten wurde meine Sicht behindert. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Einblendung der Daten vor das Auge empfand ich als hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Interaktion mittels des Dreh-/Drückknopfes war selbsterklärend. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Der Dreh-/Drückknopf ist als Steuerungseinheit gut geeignet. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das Gewicht der Weste auf den Schultern empfand ich als unangenehm. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Durch die Weste wurde meine Bewegungsfreiheit eingeschränkt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das Gewicht des HMD empfand ich als unangenehm. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Meine Motivation für die Tätigkeit ist gestiegen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



Probandennummer: _____

Wie viel geistige und physische Aktivität wurde gefordert (z. B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Suchen, Anschauen, etc.)? Das heißt, war die Tätigkeit zu kommissionieren leicht oder anspruchsvoll?

| | | | | | | | |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|
| leicht | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | anspruchsvoll |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------|

Wie anstrengend war es für Sie, die Kommissionierprozesse zu verstehen?

| | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| gar nicht anstrengend | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr anstrengend |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|

Als wie erfolgreich schätzen Sie sich ein, diese Art zu kommissionieren bewältigt zu haben?

| | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| nicht erfolgreich | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr erfolgreich |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|

Wie viel Anstrengung mussten Sie aufbringen, um sich mit der neuen Technologie im Lager zurecht zu finden?

| | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| wenig Anstrengung | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr viel Anstrengung |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|

Wie gestresst fühlten Sie sich während der Tätigkeit zu kommissionieren mit Hilfe der neuen Technologie (z. B. unsicher, entmutigt, verwirrt)?

| | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| überhaupt nicht gestresst | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | sehr gestresst |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|



Probandennummer: _____

| Welche Verbesserungsmöglichkeiten würden Sie vorschlagen? |
|-----------------------------------------------------------|
| |



Fragebogen zu Technik: Kommissionierliste

Probandennummer: _____

Wurde während des Versuches eine Sehhilfe getragen?

ja, Brille ja, Kontaktlinsen nein

| | Stimmt über- haupt nicht | Stimmt weit- gehend nicht | Stimmt eher nicht | Stimmt ein- wenig | Stimmt weit- gehend | Stimmt genau |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Die Handhabung war einfach zu lernen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Der Einsatz dieser Technologie war für das Kommissionieren hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System zeichnet sich durch seine Übersichtlichkeit aus. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung empfehlen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hilft, Fehler zu vermeiden. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Handhabung im Fehlerfall war umständlich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hat meine Eingaben immer sofort erkannt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



Probandennummer: _____

Wie viel geistige und physische Aktivität wurde gefordert (z. B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Suchen, Anschauen, etc.)? Das heißt, war die Tätigkeit zu kommissionieren leicht oder anspruchsvoll?

| | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| leicht | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | anspruchsvoll |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|

Wie anstrengend war es für Sie, die Kommissionierprozesse zu verstehen?

| | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| gar nicht anstrengend | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | sehr anstrengend |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|

Als wie erfolgreich schätzen Sie sich ein, diese Art zu kommissionieren bewältigt zu haben?

| | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| nicht erfolgreich | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | sehr erfolgreich |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|

Wie viel Anstrengung mussten Sie aufbringen, um sich mit der neuen Technologie im Lager zurecht zu finden?

| | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| wenig Anstrengung | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | sehr viel Anstrengung |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

Wie gestresst fühlten Sie sich während der Tätigkeit zu kommissionieren mit Hilfe der neuen Technologie (z. B. unsicher, entmutigt, verwirrt)?

| | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| überhaupt nicht gestresst | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | sehr gestresst |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|

Welche Verbesserungsmöglichkeiten würden Sie vorschlagen?



Fragebogen zu Technik: PbVi mit Barcodescanner

Probandennummer: _____

Wurde während des Versuches eine Sehhilfe getragen?

ja, Brille ja, Kontaktlinsen nein

| | Stimmt über- haupt nicht | Stimmt weit- gehend nicht | Stimmt eher nicht | Stimmt ein- wenig | Stimmt weit- gehend | Stimmt genau |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Die Steuerung des Systems war eindeutig. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Handhabung war einfach zu lernen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Der Einsatz dieser Technologie war für das Kommissionieren hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System zeichnet sich durch seine Übersichtlichkeit aus. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung empfehlen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hilft, Fehler zu vermeiden. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Handhabung im Fehlerfall war umständlich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das System hat meine Eingaben immer sofort erkannt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Durch das Einblenden der Daten wurde meine Sicht behindert. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Einblendung der Daten vor das Auge empfand ich als hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Die Interaktion mittels des Dreh-/Drückknopfes war selbsterklärend. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Der Dreh-/Drückknopf ist als Steuerungseinheit gut geeignet. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das Gewicht der Weste auf den Schultern empfand ich als unangenehm. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Durch die Weste wurde meine Bewegungsfreiheit eingeschränkt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Das Gewicht des HMD empfand ich als unangenehm. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Meine Motivation für die Tätigkeit ist gestiegen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



Probandennummer: _____

Wie viel geistige und physische Aktivität wurde gefordert (z. B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Suchen, Anschauen, etc.)? Das heißt, war die Tätigkeit zu kommissionieren leicht oder anspruchsvoll?

| | | | | | | | |
|--------|---|---|---|---|---|---|---------------|
| leicht | □ | □ | □ | □ | □ | □ | anspruchsvoll |
|--------|---|---|---|---|---|---|---------------|

Wie anstrengend war es für Sie, die Kommissionierprozesse zu verstehen?

| | | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|------------------|
| gar nicht anstrengend | □ | ┌ | □ | □ | ┌ | □ | sehr anstrengend |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|------------------|

Als wie erfolgreich schätzen Sie sich ein, diese Art zu kommissionieren bewältigt zu haben?

| | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|------------------|
| nicht erfolgreich | └ | └ | └ | └ | └ | └ | sehr erfolgreich |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|------------------|

Wie viel Anstrengung mussten Sie aufbringen, um sich mit der neuen Technologie im Lager zurecht zu finden?

| | | | | | | | |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------|
| wenig Anstrengung | └ | └ | └ | └ | └ | └ | sehr viel Anstrengung |
|-------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------|

Wie gestresst fühlten Sie sich während der Tätigkeit zu kommissionieren mit Hilfe der neuen Technologie (z. B. unsicher, entmutigt, verwirrt)?

| | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|----------------|
| überhaupt nicht gestresst | □ | ┌ | □ | □ | ┌ | ┌ | sehr gestresst |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|----------------|



Probandennummer: _____

Welche Verbesserungsmöglichkeiten würden Sie vorschlagen?



Abschlussfragebogen:

Probandennummer: _____

Mit welcher dieser Methoden würden Sie am liebsten arbeiten?

- Kommissionierliste PbVi II mit Bilderkennung PbVi mit Barcodescanner

Mit welcher Technik haben Sie Ihrer Meinung nach die beste Leistung erzielt?

- Kommissionierliste PbVi II mit Bilderkennung PbVi mit Barcodescanner

Mit welcher dieser Techniken würden Sie über einen längeren Zeitraum arbeiten?

- Kommissionierliste PbVi II mit Bilderkennung PbVi mit Barcodescanner

Vergleich verschiedener HMDs:

| Welches der HMDs ist für Sie am angenehmsten zu tragen? | |
|---------------------------------------------------------|-------------------|
| HMD | Rangfolge (1/2/3) |
| Nomad ND 2000 | |
| Liteye 750-A | |
| Trivisio M3 Cam | |

| Welches der HMDs hat die beste Darstellung der Informationen? | |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|
| HMD | Rangfolge (1/2/3) |
| Nomad ND 2000 | |
| Liteye 750-A | |
| Trivisio M3 Cam | |

Vergleich unterschiedlicher Schriftfarben:

| Welche Schriftfarbe empfinden Sie als optimal lesbar? | | |
|-------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
| | Vor weißer Wand | In Lagerumgebung |
| Rang 1 | | |
| Rang 2 | | |
| Rang 3 | | |



Probandennummer: _____

| | Stimmt über- haupt nicht | Stimmt weit- gehend nicht | Stimmt eher nicht | Stimmt ein wenig | Stimmt weit- gehend | Stimmt genau |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Die freie Einstellbarkeit der Anzeigeoptionen empfand ich als hilfreich. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich möchte die Farbeinstellungen gerne unabhängig von vordefinierten Werten vornehmen | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ich möchte die Farbeinstellungen gerne aus einer Lister vordefinierter Farbschemata auswählen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Durchführung eines Akkuwechsels:

| | Stimmt über- haupt nicht | Stimmt weit- gehend nicht | Stimmt eher nicht | Stimmt ein wenig | Stimmt weit- gehend | Stimmt genau |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Der Wechsel des Akkus war einfach zu vollziehen. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Welche Verbesserungsmöglichkeiten würden Sie vorschlagen?