

FORSCHUNGSBERICHT

W.A. Günthner · M. Wölfle

Papierlose Produktion und Logistik

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 **15666 N**

Papierlose Produktion und Logistik

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

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 2011

ISBN: 978-3-941702-21-9

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49 89 28915911

Telefax: + 49 89 28915922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Durch die Kombination eines mobilen, in den Arbeitsablauf integrierten RFID-Lesegerätes mit einem head-mounted Display zur Visualisierung prozessrelevanter Informationen galt es im vorliegenden Forschungsprojekt, Konzepte und Lösungen für eine flexible Bereitstellung und Nutzung von Produktions- und Logistikdaten aufzuzeigen. Mit dem zu entwickelnden System kann der Mensch auch in einer zunehmend digitalisierten Welt zu jeder Zeit und ortsunabhängig auf relevante Produkt- und Prozessinformationen zugreifen. Auf Basis dessen wurden innerhalb des Forschungsprojektes zwei Funktionsmuster entwickelt, welche die Potenziale aus der Kombination der beiden Zukunftstechnologien unterstreichen.

Innerhalb von Montageprozessen werden die für den aktuellen Montageschritt relevanten Informationen über auftragsspezifische RFID-Transponder an Behältern oder Produkten kontextbezogen bereitgestellt. Dabei werden die Daten wahlweise dezentral am Produkt mitgeführt oder über die ID des Transponders aus einer zentralen Datenbank angefordert. Die dezentrale Datenhaltung auf einem Transponder am Produkt kann zudem genutzt werden, um die Verfügbarkeit der Informationen für nachgelagerte Prozesse (Wartung, Service etc.) zu sichern. Im Bereich der Kommissionierung wird das mobile RFID-Lesegerät als Prüfmechanismus zur Vermeidung von Fehlern bei der manuellen Entnahme von Artikeln eingesetzt. Die Bereitstellung der Auftragsdaten kann dabei entweder über das head-mounted Display oder über herkömmliche Systeme wie bspw. einer Papierliste erfolgen.

In mehreren Versuchsreihen zeigte sich gerade für die RFID-unterstützte Kommissionierung das Potenzial des entwickelten Systems. Grund dafür ist die akustische Rückmeldung, welche bereits während des Griffes in ein Lagerfach auf mögliche Fehler hinweist und diese somit deutlich reduziert. Auch die subjektive Bewertung des Systems durch die Probanden war überwiegend positiv. Die eingesetzte Technik wird demnach als zukunftssträchtig eingeschätzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel	3
1.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	4
1.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	5
1.2.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
2	Grundlagen	8
2.1	Radiofrequenz Identifikation (RFID)	8
2.1.1	Physikalische und technische Grundlagen	9
2.1.2	Der Transponder: Bauformen und Speicherorganisation	11
2.2	Augmented Reality (AR)	14
2.2.1	Funktionsprinzip der Augmented Reality	15
2.2.2	Komponenten eines AR-Systems	17
2.3	Produktion und Logistik	26
2.3.1	(Manuelle) Montage	26
2.3.2	Montagenahe Kommissionierung	33
2.4	Stand der Forschung: Wearable Computing in Produktion und Logistik	40
2.4.1	Begriffsabgrenzung	41
2.4.2	Stand der Forschung	42
3	Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse	49
3.1	Einsatzszenarien	49
3.1.1	Bewertungskriterien zur Auswahl der Einsatzszenarien	51
3.1.2	Bewertung und Auswahl der Einsatzszenarien	53
3.1.3	Spezifikation der Einsatzszenarien	56

3.2	Anforderungsanalyse	61
4	Informationsdarstellung und Interaktion	63
4.1	Gestaltungsrichtlinien	63
4.1.1	Gestaltungsrichtlinien zur Informationsdarstellung	64
4.1.2	Gestaltungsrichtlinien zur Interaktion	67
4.2	Visualisierungs- und Interaktionskonzepte	68
4.2.1	Allgemeingültige Gestaltungselemente	69
4.2.2	Konzept „ARVIKA“	73
4.2.3	Konzept „Kreisnavigation“	76
4.2.4	Konzept „Imaginäres Band“	79
4.2.5	Bewertung und Auswahl der Konzepte	81
5	Entwicklung der Systemarchitektur und Basisgeräteumgebung	88
5.1	Referenzprozess	88
5.2	Komponenten des Systems	92
5.2.1	Mobiles RFID-Schreib-/ Lesegerät	93
5.2.2	RFID-Transponder	94
5.2.3	Head-mounted Display	97
5.2.4	Trackingsystem	99
5.2.5	Interaktionsgeräte	101
5.3	Entwicklung eines Systems zur Unterstützung von Montageprozessen	103
5.3.1	Das Montageobjekt im Funktionsmuster	104
5.3.2	Datenhaltung im Funktionsmuster „Montageunterstützung“	106
5.3.3	Umsetzung des Funktionsmusters am Demonstrator	114
5.4	Entwicklung eines Systems zur RFID-unterstützten Kommissionierung	117
5.4.1	Lagereinrichtung und -inhalt im Funktionsmuster	117
5.4.2	Umsetzung der RFID-gestützten Kommissionierung	120
6	Evaluierung der Basisgeräteumgebung in Labor- und Praxistest	123
6.1	Evaluation im Labortest	123
6.1.1	Versuchsdurchführung	123
6.1.2	Versuchsergebnisse	126
6.2	Evaluation im Praxistest	134
6.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	134

6.2.2 Versuchsergebnisse	136
7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	140
7.1 Zusammenfassung	140
7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	142
Literaturverzeichnis	143
Abkürzungsverzeichnis	152
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellenverzeichnis	156
Anhang A: Elementare Montageprozesse	157
Anhang B: Bewertung der Einsatzszenarien	160
Anhang C: Lastenheft	162
Anhang D: Bewertung der Visualisierungs- und Interaktionskonzepte	165
Anhang E: Fragebogen zur Evaluation	169

1 Einleitung

Das Forschungsprojekt „Papierlose Produktion und Logistik“ beschäftigt sich mit der Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur flexiblen Bereitstellung und Nutzung von Produktions- und Logistikdaten durch den Einsatz der Radiofrequenz Identifikation (RFID). Zur ortsunabhängigen Visualisierung der prozessrelevanten Informationen findet zudem die Augmented Reality (AR) Technologie Anwendung.

1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Die steigende Individualisierung von Produkten, welche mit einer erhöhten Variantenvielfalt einhergeht, stellt zunehmend hohe Ansprüche an Produktions- und Logistikprozesse um flexibel mit der Vielfalt an Produkten umgehen zu können. Dabei steigen vor allem die Anforderungen an die Bereitstellung relevanter Produkt- und Prozessinformationen, die häufig nur auf Umwegen möglich ist. Eine für die Ausführung der Tätigkeiten unzureichende Informationsbereitstellung lässt bspw. den Aufwand bereits bei der Suche und Auswahl eines Bauteils steigen. Zudem verursachen Arbeitsanweisungen auf Basis von Papierbelegen oder stationären Datenterminals vielfach lange Wege und Zeiten bis zur eigentlich wertschöpfenden Tätigkeit. Abhilfe kann dabei der Einsatz der RFID-Technologie schaffen.

Durch die Kennzeichnung von Produkten, Ladungsträgern oder Ladehilfsmitteln mit RFID-Transpondern können relevante Informationen dezentral am Objekt mitgeführt werden. Die Aufnahme und Verarbeitung der Daten innerhalb physischer (Logistik-) Prozesse wird für den Menschen dadurch jedoch zunehmend erschwert. Werden Produkt- oder Prozessinformationen ohne zusätzliche Visualisierung (z. B. mittels Etiketten) autark auf einem Transponder mitgeführt, findet der Mensch ohne zusätz-

liche Hilfsmittel keinen Zugang zu den digitalisierten Daten. Daher gilt es, die infolge einer voranschreitenden Digitalisierung der Informationsbereitstellung auftretenden Medienbrüche zwischen virtueller und realer Welt in erster Linie dort zu beherrschen, wo die Teilnahme des Menschen am System unumgänglich ist [Fle-05]. Gerade bei mobilen Anwendungen in Produktion und Logistik muss sichergestellt werden, dass dem Menschen trotz fortschreitender Technologie zu jeder Zeit und unter möglichst geringem Aufwand alle benötigten Informationen zur Verfügung stehen. Nur so kann der Mensch an den erforderlichen Stellen in die virtuelle Welt integriert werden (Abbildung 1).

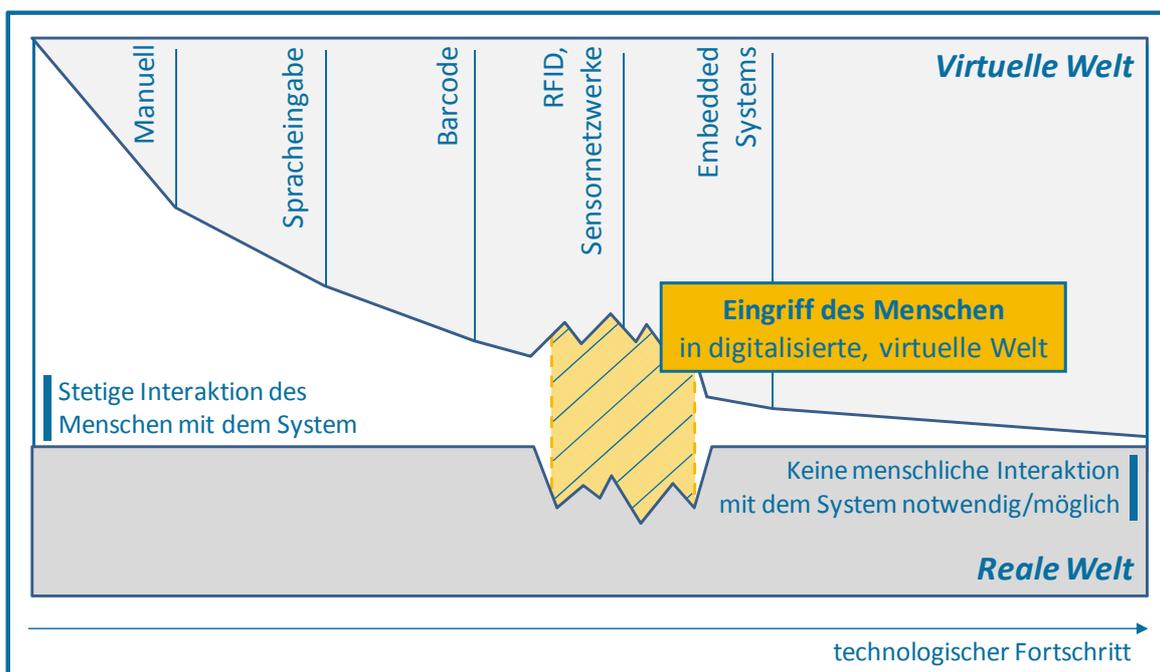


Abbildung 1: Der Mensch im Internet der Dinge (in Anlehnung an [Fle-05])

Obgleich RFID-Systeme immer mehr Anwendung in Produktion und Logistik finden, bleiben dennoch Hemmnisse und Unsicherheiten hinsichtlich einer möglichen Einführung der Technologie bestehen. So lässt sich die Nutzung des bereits applizierten Transponders über den primär verfolgten Einsatzzweck hinweg oftmals nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand realisieren. Gerade eine bereichsübergreifende Verwendung der Datenträger – egal ob auf Ladehilfsmitteln, Ladungsträgern oder Produkten – kann jedoch einen erheblichen Teil der wirtschaftlichen Rentabilität des RFID-Projektes einnehmen. Aus diesem Grund gilt es, Wege und Methoden aufzuzeigen, inwiefern eine durch Transponder mitgeführte Information unter verschiedenen Rahmenbedingungen und innerhalb unterschiedlicher Prozessabläufe Verwen-

derung finden kann. Die Beherrschung der Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, d. h. der Vernetzung des Informationsflusses zwischen einzelnen logistischen Prozessen steht dabei an oberster Stelle. Die Konzepte zur Identifikation der gekennzeichneten Objekte reichen von Pulkerfassungen an Wareneingangstoren bis hin zu mobilen Einzelerfassungen bei der Bewältigung logistischer Tätigkeiten. Eine übergreifende und durchgängige Nutzung der Transponderdaten unter Berücksichtigung menschlicher Eingriffe kann in letzter Konsequenz zur papierlosen Gestaltung sämtlicher Produktions- und Logistikprozesse führen.

Die Verwendung eines mobilen und in den Arbeitsablauf integrierten RFID-Lesegerätes greift beide Problemstellungen auf. Zum einen sind die auf den Transpondern digital gespeicherten Informationen zu jeder Zeit verfügbar. Andererseits können die vorhandenen Daten bereichsübergreifend an jedem Ort für weitere Aufgaben genutzt werden. Die Visualisierung und Darstellung der aus den Transpondern gewonnenen Informationen bleibt dabei jedoch offen.

1.2 Forschungsziel

Neben einer fehlenden bereichsübergreifenden Nutzung der RFID-Transponder wird die Technologie häufig lediglich zur Erfassung und Interpretation der Daten genutzt. Durch die Verwendung der bereits vorhandenen Information für weitere Aufgaben (z. B. als Prüfmechanismus auch bei manuellen Tätigkeiten) lassen sich jedoch nicht nur zusätzliche Prozesszeiten reduzieren, sondern ebenso die Qualität der Prozessabläufe erhöhen. Beide Aspekte können zur wirtschaftlichen Absicherung der RFID-Anwendung führen. Neben den Potenzialen der RFID-Technologie werden in der vorliegenden Arbeit auch die Möglichkeiten einer kontextbezogenen Visualisierung der Informationen thematisiert. Durch die Verwendung eines sog. head-mounted Displays (HMD) kann der Mitarbeiter mit dem entwickelten System stets zur richtigen Zeit und am richtigen Ort auf die Transponderdaten (bzw. dahinterliegende Datenbankstrukturen) zurückgreifen. Die Visualisierung von Informationen bei voller haptischer Verfügbarkeit beider Hände ermöglicht eine Fokussierung auf rein wertschöpfende Tätigkeiten und kann zusätzlich entscheidend zur Qualitätssteigerung beitragen. Sequenzielle Abläufe bei der Informationsbeschaffung, der Informations-

aufnahme und der Durchführung der Arbeitsaufgabe werden parallelisiert. Zudem kann der Mitarbeiter durch die Bereitstellung weiterer Informationen, wie bspw. Montageanleitungen, Arbeitspläne oder Qualitätsdaten unterstützt werden.

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung von Konzepten zur papierlosen Bereitstellung von Informationen in Produktions- und Logistikprozessen auf Basis der Radiofrequenz Identifikation. Durch die Kombination des RFID-Systems mit Elementen der Augmented Reality soll zudem eine ortsunabhängige Darstellung der relevanten Informationen umgesetzt werden. Demnach kann die Informationsbereitstellung in die beiden Bereiche Informationsträger und Informationsdarstellung unterteilt werden (Abbildung 2).

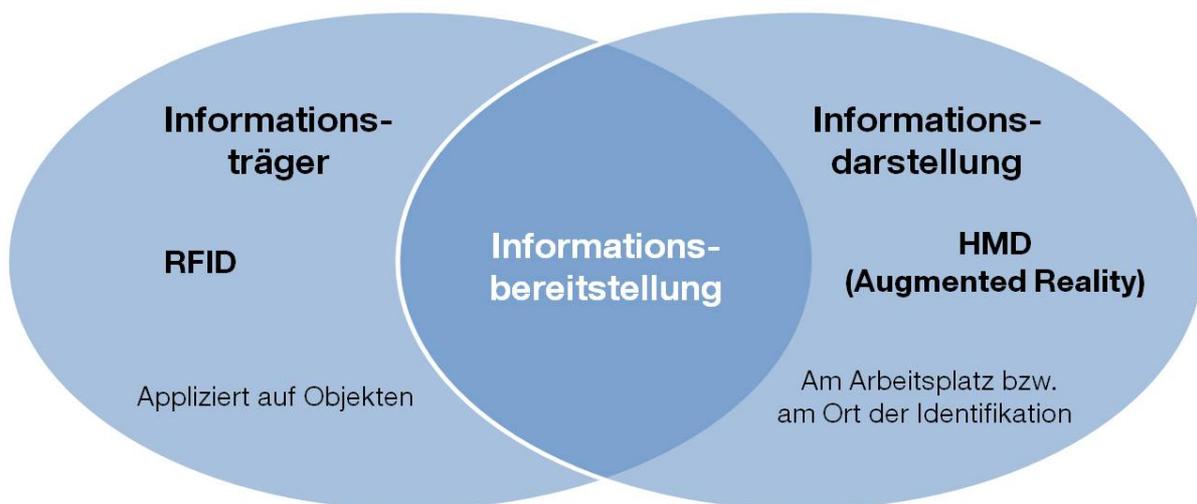


Abbildung 2: Informationsbereitstellung mit RFID und AR

Montage- und produktrelevante Informationen werden auf RFID-Transpondern an Produkten, Ladungsträgern oder Ladehilfsmitteln mitgeführt. Die auf den Transpondern hinterlegten Daten können dem Mitarbeiter dann über das head-mounted Display kontextbezogen und bei vollständiger Bewegungsfreiheit der Hände bereitgestellt werden. Auf Grundlage dessen ergeben sich die Anforderungen an das System:

- Kontextbezogene Bereitstellung von Informationen mittels RFID-Transponder
- Bereitstellung der Informationen direkt am Produkt oder Ladungsträger
- Ortsunabhängige Darstellung prozessrelevanter Informationen

- Visualisierung der Informationen über ein head-mounted Display
- Visualisierung elektronischer Arbeitspläne direkt am Ort der Tätigkeit
- Einsatz eines Trackingsystems zur lagegerechten Einblendung von Daten
- Unterstützung des Mitarbeiters durch visuelle Führung bei der Montage
- Reduzierung nicht-wertschöpfender Tätigkeiten
- Qualitätssteigerung im Prozessablauf
- Volle Verfügbarkeit beider Hände im Arbeitsablauf
- Intuitive Bedienung des Systems durch kurze Anlernzeiten

Die im Projekt entwickelten Funktionsmuster zur Umsetzung der Konzepte unter Berücksichtigung der angestrebten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen von mehreren Versuchsreihen evaluiert.

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Im Forschungsprojekt wird durch die Kombination der RFID- und AR-Technologie ein System erarbeitet, mit dessen Hilfe die am Prozess beteiligten Personen jederzeit flexibel und ortsunabhängig auf dezentral gespeicherte Daten zugreifen können. Durch die Kombination der beiden Technologien können Produktions- und Logistikprozesse ohne Begleitbelege gestaltet werden, da die vom Transponder bezogenen Daten direkt über das HMD nutzbar gemacht werden. Im Hinblick auf die steigende Typen- und Variantenvielfalt wird eine Methode entwickelt, die nicht nur die Möglichkeit zur kontinuierlichen Aktualisierung der Datensätze ermöglicht, sondern ebenso ein Höchstmaß an Flexibilität in der Informationsbereitstellung, Visualisierung und Manipulation der Daten mit sich bringt. Gerade wenn Informationen für mehrere Prozessschritte bisher in einem Dokument zusammengefasst werden (bspw. in Form von komplexen Zusammenbauzeichnungen), kann durch eine Aufbereitung der Informationen für einzelne Arbeitsschritte die Zeit zur Beschaffung der für den anstehenden Prozess relevanten Information erheblich reduziert werden. Eine problem- und anwenderorientierte Informationsdarstellung mit ereignisorientierten Dialogformen hilft dem Menschen bei seiner Tätigkeit. Zudem wird durch eine selbsterklärende Darstellung aller nötigen Informationen die Anlernkurve neuer Mitarbeiter verkürzt [Rad-99]. Durch den Einsatz des HMD kann der Mitarbeiter stets

zur richtigen Zeit und am richtigen Ort ergonomisch mit relevanten Informationen für den aktuellen Prozessschritt versorgt werden. Durch den visuell geführten Arbeitsablauf kann sich der Mitarbeiter verstärkt auf seine Kernaufgabe konzentrieren, was sich in einer Steigerung der Produkt- und Prozessqualität zeigt. Dies wird zudem durch die Verwendung der RFID-Transponder zur Fehlervermeidung in der Kommissionierung unterstützt. Das mobile RFID-Lesegerät am Handgelenk des Mitarbeiters kann genutzt werden, um die Entnahme von Artikeln abzusichern ohne den Werker dabei zu beeinträchtigen. Beim Griff in ein Lagerfach wird ohne zusätzlichen Aufwand für den Mitarbeiter ein dem Artikel zugeordneter Transponder erfasst. Dadurch ist es im Falle eines fehlerhaften Griffes möglich, direkt am Ort der Entnahme eine Rückmeldung anzustoßen und auf den Fehler hinzuweisen.

1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die in den vorangegangenen Punkten erläuterten Forschungsziele wurden in sieben aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP) erarbeitet:

AP1: Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

Erarbeitung potenzieller Einsatzszenarien eines kombinierten Einsatzes von RFID und AR; Dokumentation der Ergebnisse in Form eines Lastenheftes

AP2: Systemarchitektur und Schnittstellendefinition

Definition von Datenbereitstellungskonzepten unter Abgrenzung dezentral und zentral bereitgestellter Daten; Abbildung möglicher Prozessmodelle und Schnittstellen

AP3: Informationsdarstellung und Interaktion

Analyse und Konzeption der Informationsdarstellung; Ermittlung der Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine; Definition der Interaktionen

AP4: Konzeption des Systems und Recherche geeigneter Hard- und Software

Konzeption des Systems unter Berücksichtigung der Rechercheergebnissen zu Hard- und Softwarekomponenten

AP5: Entwicklung der Basisgeräteumgebung

Entwicklung von Funktionsmustern zur RFID-unterstützten Kommissionierung sowie zur Unterstützung von Montageprozessen durch den Einsatz von RFID und AR

AP6: Evaluierung der Basisgeräteumgebung im Labor- und Praxistest

Evaluierung der entwickelten Funktionsmuster in Laboruntersuchungen an der Forschungsstelle sowie durch Praxistest in industrieller Umgebung

AP7: Dokumentation

Erstellung eines Forschungsberichtes; Dokumentation aller für die Auslegung und den Einsatz des RFID-AR-Systems relevanten Faktoren

Die Struktur des vorliegenden Forschungsberichtes basiert auf den beschriebenen Arbeitspaketen. Zunächst werden die Grundlagen für die Entwicklung eines Systems zur „papierlosen Produktion und Logistik“ dargestellt. Anschließend werden verschiedene Einsatzszenarien hinsichtlich des Potenzials für den Einsatz eines RFID-AR-Systems untersucht. Nach der Darstellung der Rahmenbedingungen zur Auswahl eines Visualisierungskonzeptes sowie zur Definition der notwendigen Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine werden die entwickelten Funktionsmuster vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse der Versuchsreihen in Labor und Praxis präsentiert.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden Definitionen sowie wesentliche Grundlagen zur Entwicklung des Systems zur „papierlosen Produktion und Logistik“ dargelegt. Die beiden ersten Abschnitte dienen der Vermittlung von grundlegendem Wissen zu den beiden im Projekt verwendeten Technologien und geben zudem einen Überblick über den Stand der Forschung. Im dritten Abschnitt werden die Prinzipien der Logistik sowie Grundzüge der manuellen Montage und Kommissionierung dargestellt. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über den Stand der Forschung im Bereich des Wearable Computing in Produktion und Logistik.

2.1 Radiofrequenz Identifikation (RFID)

Die Radiofrequenz Identifikation (RFID) wird in die Gruppe der automatischen Identifikationssysteme (AutoID-Systeme) eingeordnet und ermöglicht eine eindeutige, schnelle, berührungslose und gleichzeitige Identifikation von Objekten und Personen ohne die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung.

RFID-Systeme bestehen grundsätzlich aus drei Komponenten. Die für die Erfassungsaufgabe 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. Das Antennenkabel stellt eine weitere, die Leistung des Gesamtsystems beeinflussende Komponente dar. Nach erfolgreicher Identifikation der auf dem Transponder gespeicherten Daten werden diese in einer (Anwendungs-) Software 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. Die Funk-

strecke beinhaltet dabei nicht nur die Materialien zwischen den beiden Komponenten, sondern umfasst ebenso die räumliche Umgebung des Erfassungssystems. Für individuelle Lösungen können einzelne Komponenten hinzukommen bzw. entfallen (vgl. Abbildung 3).

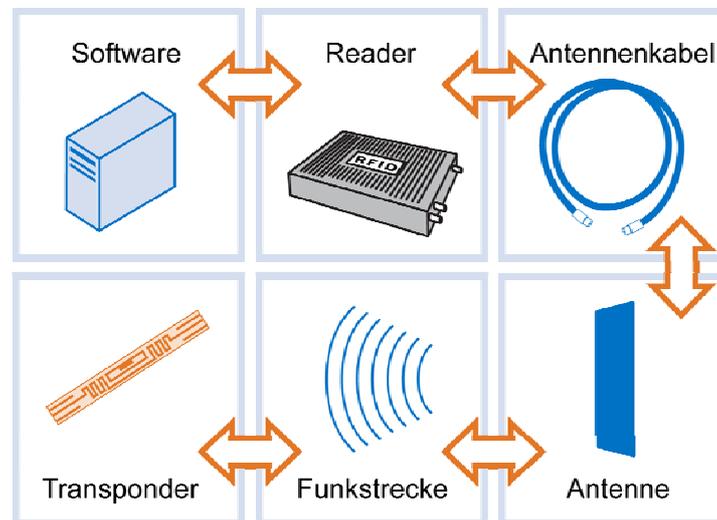


Abbildung 3: Komponenten eines RFID-Systems

Neben den physikalischen Grundlagen sind im Forschungsprojekt vor allem der Aufbau der Transponder sowie die Gestaltung der Datenübertragung von Relevanz.

2.1.1 Physikalische und technische Grundlagen

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften elektromagnetischer Wellen ist die Auswahl der Frequenz ein entscheidendes Merkmal für die Funktionalität des Erfassungssystems. RFID-Systeme arbeiten auf verschiedenen Frequenzbereichen, die jeweils spezifische Eigenschaften (z. B. Abmessungen der Antennen, Durchdringung von Flüssigkeiten, Lesereichweite etc.) haben. Tabelle 1 stellt die Frequenzbereiche qualitativ gegenüber (vgl. z. B. [Fin-08], [Ker-07]).

Für die Anwendungen im Forschungsprojekt „papierlose Produktion und Logistik“ eignen sich u. a. aufgrund der Anforderungen an die erforderliche Lesereichweite sowie an die Datenübertragungsrate die beiden Frequenzen im HF- und UHF-Bereich. Im Forschungsprojekt wird eine mobile RFID-Lösung durch die Verwendung eines Lesegerätes am Handgelenk des Mitarbeiters verfolgt. Unter Berücksichtigung des hohen Wassergehaltes des menschlichen Körpers, der mehr als die Hälfte des Körpergewichtes ausmacht [ScR-00] sowie des Einflusses von Flüssigkeiten

auf das RFID-System haben HF-Systeme im Frequenzbereich von 13,56 MHz zunächst Vorteile gegenüber UHF-Systemen. Aufgrund der Zielstellung, Transponder auf Ladehilfsmitteln, Ladungsträgern oder Produkten möglichst bereichsübergreifend verwenden zu können sowie der hohen Verbreitung der UHF-Technologie in Produktion und Logistik konzentrieren sich die Arbeiten im Forschungsprojekt auf den UHF-Bereich. Durch konstruktive Maßnahmen bei der Entwicklung des RFID-Lesegerätes können die Nachteile des Frequenzbereiches hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber dem menschlichen Wassergehalt weitestgehend ausgeglichen werden. Zudem haben UHF-RFID-Systeme Vorteile durch eine höhere Lesereichweite und höhere Datenübertragungsraten.

	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

Tabelle 1: Eigenschaften der Frequenzbereiche von RFID-Systemen

Eine weitere Eigenschaft, die im Zusammenhang mit der RFID-Technik von Bedeutung ist, ist die Polarisierung elektromagnetischer Wellen (vgl. Abbildung 4). Die Polarisierung wird durch die Lage der Ebene bestimmt, in der sich das Feld der Welle befindet. Neben der ebenen Linearpolarisation (vertikal bzw. horizontal) gibt es die Zirkularpolarisation, bei der die Lage der Ebene zyklisch rotiert. Die Energieübertragung ist bei linearer Polarisierung am größten, wenn die Polarisierungsrichtung beider Antennen identisch ist. Da bei RFID-Systemen die Lage der Transponder zum Lesegerät normalerweise nicht bestimmt ist, können große Schwankungen in der Lesereichweite auftreten. Bei zirkularer Polarisierung fällt dieser Effekt dagegen wesentlich

geringer aus. Zirkular polarisierte Wellen sind jedoch technisch aufwändiger zu erzeugen, weshalb in der Praxis beide Möglichkeiten verwendet werden [Fin-08].

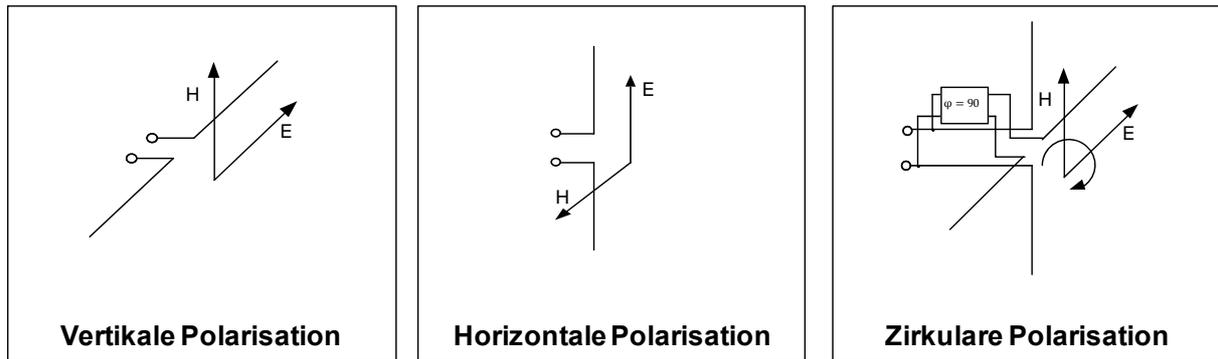


Abbildung 4: Polarisation elektromagnetischer Wellen [Fin-08]

Treffen die elektromagnetischen Wellen auf den Transponder, wirkt dieser als Antenne. Durch Induktion entstehen in der Antenne Ströme, die für die Übertragung von Informationen und in den meisten Fällen auch für die Energieversorgung genutzt werden. Die Induktion geschieht ähnlich wie bei einem Transformator, bei dem der Strom von einer Primärspule über einen Eisenkern an eine Sekundärspule überführt wird. Da bei RFID-Systemen das Übertragungsmedium meist Luft ist, welche im Vergleich zu Eisen eine wesentlich kleinere relative Permeabilität aufweist, erfolgt die Energieübertragung deutlich ineffizienter. Daraus resultieren die relativ kleinen Leseabstände. Um den Wirkungsgrad dennoch deutlich zu verbessern, wird durch die Parallelschaltung eines zusätzlichen Kondensators zur Transponder-Antenne ein Schwingkreis gebildet, dessen Resonanzfrequenz der jeweiligen Arbeitsfrequenz des verwendeten RFID-Systems entspricht [Fin-08]. Die übertragbare Energiemenge ist jedoch trotzdem nicht ausreichend, um eine aktive Antenne auf dem Transponder zu betreiben. Für die Datenübertragung vom Transponder zum Lesegerät verwendet man daher den umgekehrten Weg: Befindet sich ein Transponder im Feld des Readers, so entzieht der Transponder dem magnetischen Feld Energie. Verändert man nun den Betrag dieser Energie, lassen sich Informationen übertragen.

2.1.2 Der Transponder: Bauformen und Speicherorganisation

Der Transponder (Kunstwort aus TRANSmitter und resPONDER) ist der eigentliche Datenträger des RFID-Systems und besteht üblicherweise aus zwei Elementen, ei-

ner integrierten Schaltung (IC) und einem Koppellement, der Antenne (vgl. Abbildung 5).

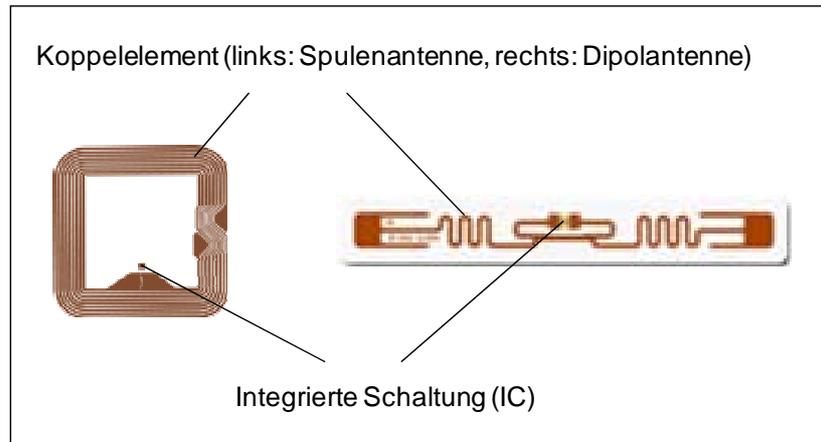


Abbildung 5: Aufbau von Transpondern

Die Energieversorgung der Mikrochips auf dem Transponder ist eines der Hauptmerkmale zur 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. Daraus resultierend sind passive Transponder meist in Speicherkapazität und Lesereichweite begrenzt. Beide Leistungsgrößen können durch eine eigene Energieversorgung erhöht werden (aktive Transponder), wodurch bspw. zudem die Integration zusätzlicher Sensorik ermöglicht wird. Nachteilig sind neben dem deutlich höheren Kosten allerdings die begrenzte Lebensdauer und die größere Bauform [Fin-08].

Die übliche Kapazität eines Transponders reicht von wenigen Bytes bis zu einigen Kilobytes. Für Massenanwendungen in Produktion und Logistik werden in der Regel kostengünstige, passive Transponder verwendet, wobei meist die Codierung in Form einer Identifikationsnummer, wie bspw. dem elektronischen Produktcode (EPC) ausreicht. Produkt- oder prozessbezogene Daten werden dann in einer zentralen Datenbank gehalten und können über ein lokales oder globales Netzwerk abgerufen werden (Data-on-Network). Darüber hinaus können jedoch auch mehrere Daten direkt auf dem Transponder gespeichert werden, um auch ohne Datenbankzugriff auf relevante Daten zugreifen zu können (Data-on-Tag). Neben den beiden reinen Formen existieren zusätzlich hybride Datenhaltungskonzepte, die eine Mischung aus den genannten Konzepten darstellen [Tam-10, Fin-08].

Um die Speichernutzung der Tags – vor allem auch im UHF-Frequenzbereich – zu vereinheitlichen, beschäftigt sich die Organisation EPCglobal mit der weltweiten Normung und Festlegung von Spezifikationen für Transponder. Die Nutzung des Transponder-Speichers basiert in der vorliegenden Arbeit auf dem EPC Class 1 Generation 2 Standard [EPC-08]. Der Speicher gliedert sich demnach in vier logisch getrennte Speicherbänke (vgl. Abbildung 6). Im optionalen User Memory können anwenderspezifische Informationen hinterlegt werden. Hier werden beispielsweise die prozessrelevanten Daten beim Data-on-Tag-Verfahren gespeichert. In einem weiteren Block wird die Tag ID (TID) gespeichert, die eine Identifizierung des Transponder-Typs sowie des Herstellers ermöglicht. Die Nummern werden bereits bei der Fertigung der Transponder geschrieben und mit einem Schreibschutz versehen. Die TID kann außerdem eine Seriennummer enthalten, die jeden einzelnen Transponder unterscheidbar macht. Diese Seriennummern sind bereits für einige, kommerziell verfügbare Transponder erhältlich und sollen in Zukunft ein gewöhnliches Feature werden [EPC-08]. Während die Speicherbereiche im User Memory geändert werden können, ist die TID nicht veränderbar und trägt so zum Schutz gegen Missbrauch bei.

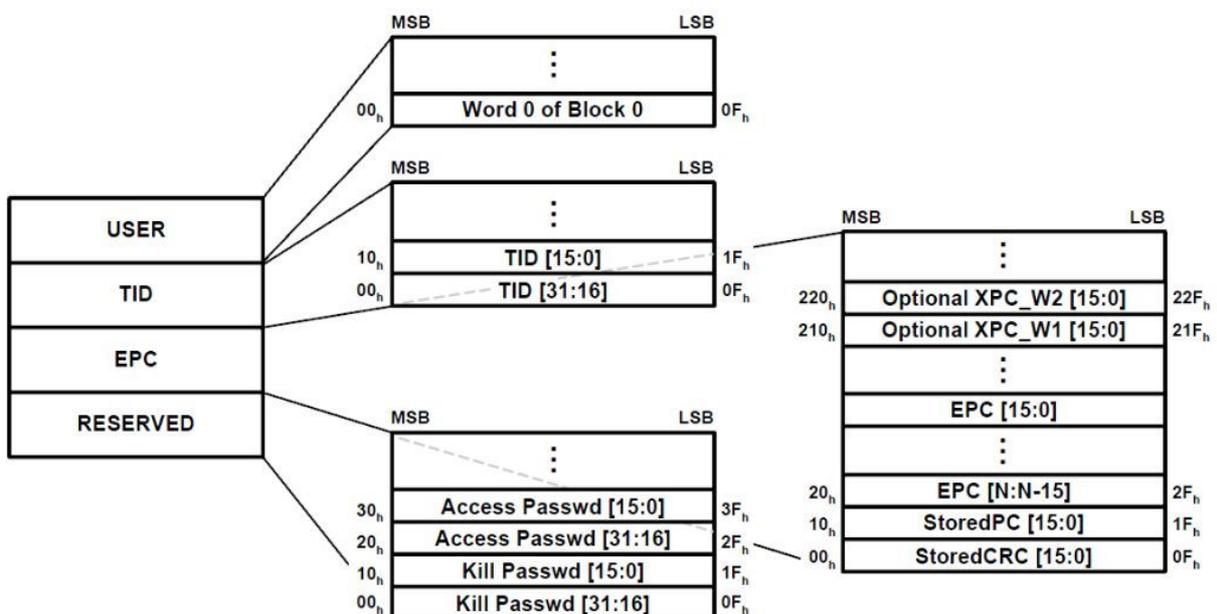


Abbildung 6: Speicherorganisation EPC Class 1 gen2 Transponders [EPC-08]

Der eigentliche Produktcode (EPC) ist eine Ziffernfolge mit einer Länge von meist 96 Bit und wird in einem separaten Block abgelegt. Der EPC setzt sich aus mehre-

ren Komponenten zusammen [EPC-10]. Der Header kennzeichnet die nachfolgende Kategorie, der Filterwert definiert den Typ der gekennzeichneten Einheit (Artikel, Palette oder Karton). Darauf folgt in der Partition die Information, an welcher Stelle sich der EPC-Manager (eindeutige ID des Herstellers) und die Objektklassennummer (die Artikelnummer des Produkts) befinden. Die Seriennummer zum Schluss des EPC enthält eine fortlaufende Nummer des Artikels [EPC-10]. Im Bereich „Reserved“ des Transponder-Speichers werden Passwörter zum Schutz vor ungewollten Zugriffen bzw. zum Schutz vor Zerstörung des Transponders gespeichert.

2.2 Augmented Reality (AR)

Bei der Augmented Reality („Erweiterte Realität“) wird die reale Umgebung des Menschen mit virtuellen, rechnergenerierten Informationen angereichert (vgl. z. B. [Alt-03]). Dabei wird nicht nur der visuelle Sinn [Azu-01], sondern beliebige menschliche Sinneswahrnehmungen angesprochen [Mil-99]. Aufgrund seiner Dominanz steht der visuelle Sinn jedoch meist im Vordergrund. Zur Einordnung der Technologie und Abgrenzung gegenüber der Virtual Reality (VR) entwickelte Milgram bereits 1994 das sog. Reality-Virtuality-Continuum (RV), welches jedoch bis heute zitiert wird ([Mil-94], [Mil-99]). Dabei wird AR zwischen einer reinen, nicht modellierten realen Welt und einer komplett modellierten, virtuellen Welt eingeordnet, im Gegensatz zur Augmented Virtuality (AV) jedoch näher an der Realität (vgl. Abbildung 7).

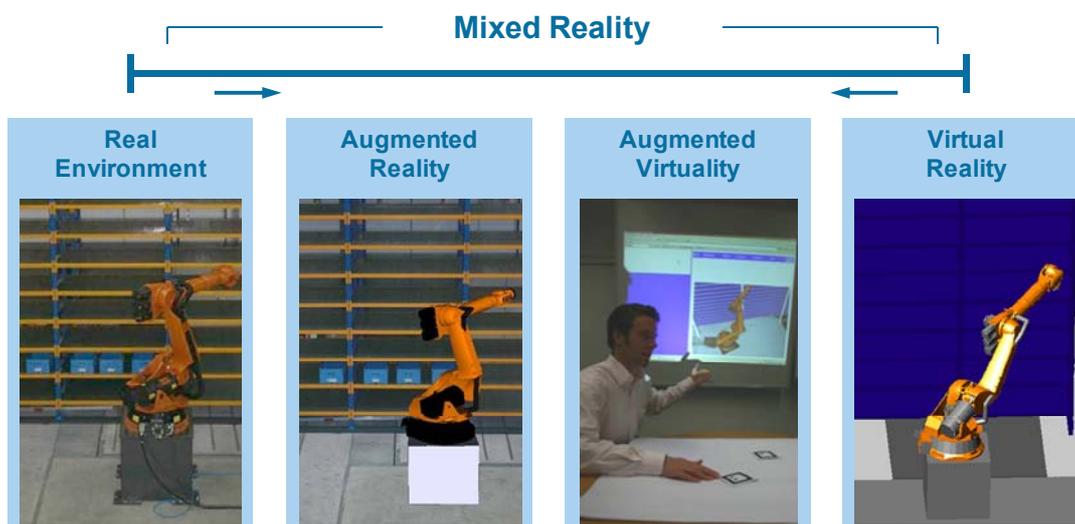


Abbildung 7: Reality-Virtuality-Continuum ([Mil-94], [Reif-09])

In Abhängigkeit unterschiedlicher Ausprägungen von AR-Systemen existieren in der Fachliteratur verschiedene Definitionen der Technologie. Werden die technischen Eigenheiten verschiedener Systeme möglichst nicht berücksichtigt, so kann die Augmented Reality als ein System definiert werden, welches reale und virtuelle Objekte dreidimensional kombiniert und in eine 3D-Beziehung stellt sowie interaktiv und in Echtzeit gehandhabt wird (vgl. z. B. [Azu-97], [Bau-07]). Zur Umsetzung von Maximalanforderungen an das AR-System gilt es, die dreidimensionalen, virtuellen Objekte in der richtigen Perspektive sowie – bezogen auf das reale Umfeld – exakt an der richtigen Position visualisiert werden. Dies ist jedoch nicht für jede Anwendung der Technologie erforderlich. Nach [Rei-09] sowie [Alt-03], [Fri-04] und [Pat-04] können drei Arten der Informationsbereitstellung unterschieden werden:

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

2.2.1 Funktionsprinzip der Augmented Reality

Bei der Augmented Reality werden rechnergenerierte Informationen situationsgerecht, d. h. zur richtigen Zeit und am richtigen Ort der Realität überlagert. Zur Visualisierung der Informationen können Datenbrillen (sog. head-mounted Displays, HMD) Anwendung finden. Die tragbaren Geräte werden dabei direkt im Sichtfeld des Nutzers positioniert. Dadurch kann die reale Welt derart mit der virtuellen Welt kombiniert werden, dass eine echtzeitfähige Interaktion des Nutzers mit der neugeschaffenen, dreidimensionalen Umgebung möglich wird [Azu-97].

In Anlehnung an [Alt-03] zeigt Abbildung 8 am Beispiel der Datenbrillen das allgemeine Funktionsprinzip zur Überlagerung der realen Welt mit virtuellen Informationen, wobei diese in der sog. virtuellen Objektweite ($x_V \sim x_A$) angezeigt werden. Im Abstand ($x_R - x_A$) vom Auge des Anwenders befinden sich die realen Objekte. Die Überlagerung der virtuellen und realen Elemente entsteht durch deren gleichzeitiges

Wahrnehmen durch den Betrachter. Exemplarisch zeigt Abbildung 8 zudem eine Überlagerung von realen und virtuellen Objekten. Hier wird dem Werker beim Kommissionieren der Weg durch das Lager gezeigt. Bei dieser Überlagerung können sowohl statische (z. B. ein Textblock) als auch dynamische Informationen, die sich in Abhängigkeit von der Position und der Blickrichtung des Nutzers perspektivisch anpassen, dargestellt werden. Durch die Anwendung der Augmented Reality kann der Nutzer somit situations- und bedarfsgerecht in seiner Kerntätigkeit unterstützt werden. Zum Teil können dadurch auch Informationen angezeigt werden, die der Mensch mit seinen Sinneswahrnehmungen nicht direkt bemerkt hätte [Azu-97].

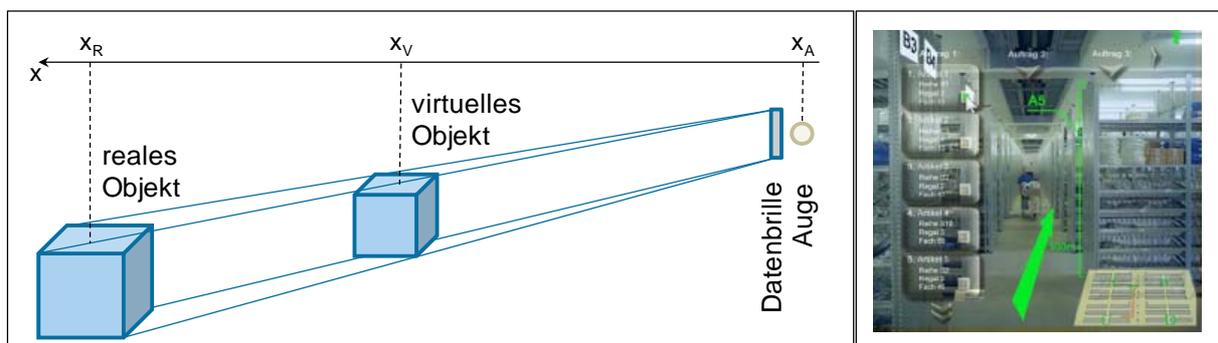


Abbildung 8: Überlagerung von realen und virtuellen Objekten [Alt-03] (li.), Anwendung in der Kommissionierung [Gün-09] (re.)

Dadurch wird die Flexibilität des Menschen mit den schnellen Berechnungsprozessen von Rechenanlagen kombiniert. Zudem ergeben sich durch den Einsatz von AR-Systemen erhebliche Einsparpotenziale und Prozessverbesserungen. Der Kommunikationsaufwand wird trotz der Gewährleistung einer hohen Flexibilität verringert. Ein Beispiel für das Potenzial der Technologie ist die Reduzierung von Prozesszeiten, welche im Rahmen des Projektes ARVIKA festgestellt wurde. Dabei konnte eine Minderung der Kommissionierzeit um ca. 26 % durch den Einsatz eines AR-Systems gegenüber dem herkömmlichen, belegbasierten System erzielt werden [Alt-03]. Dies beruht auf der Reduzierung der nichtwertschöpfenden Tätigkeiten, wie z. B. dem Suchen von Informationen.

2.2.2 Komponenten eines AR-Systems

Nach [Rei-09] setzt sich ein Augmented Reality System aus den fünf Hauptkomponenten Visualisierungsmedium, Trackingsystem, Datenhaltungssystem, Szenengenerator und Interaktionsgerät zusammen (vgl. Abbildung 9).

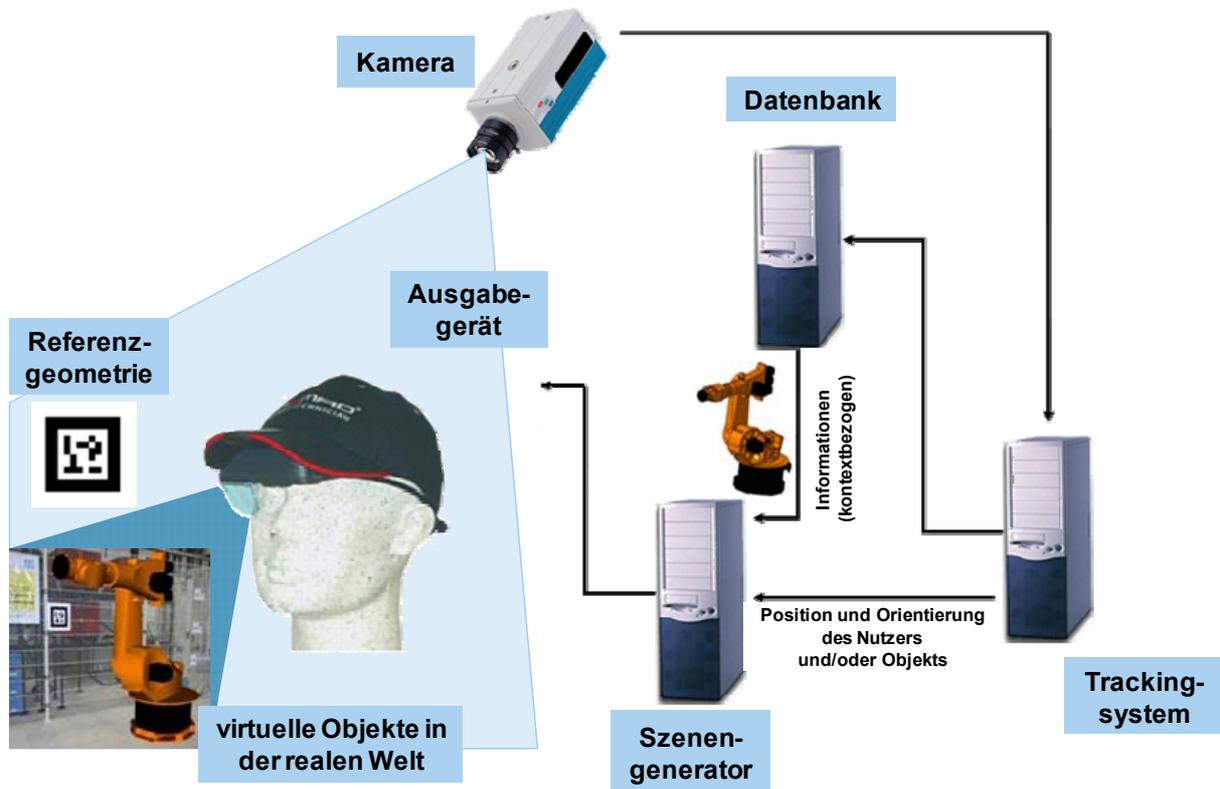


Abbildung 9: Komponenten eines Augmented Reality Systems [Rei-09]

Im AR-System kombiniert das Visualisierungsmedium die reale Welt mit den virtuellen, rechnergenerierten Zusatzinformationen. Auf diese Weise wird eine neue Szene gebildet, reale und virtuelle Objekte werden zeitgleich wahrgenommen (vgl. z. B. [Alt-03], [Rei-09]). Als direkte Schnittstelle zum Menschen ist das Visualisierungsmedium jedoch ein entscheidender Faktor, um den Menschen bedarfsgerecht und ergonomisch mit relevanten Informationen zu versorgen und so eine möglichst hohe Nutzerakzeptanz zu erreichen. Eine Kamera kann bei visuellen AR-Systemen sowohl als Bestandteil des Trackingsystems, als auch zur Aufnahme der realen Welt verwendet werden [Pat-04]. Je nach Variation des AR-Systems ist diese jedoch nicht zwingend erforderlich. Das Trackingsystem ist notwendig, um die Position und die Orientierung von Objekten oder Systemnutzern zu ermitteln. Die aus dem Tracking-

system 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-08]. Das Datenhaltungssystem beinhaltet sämtliche für die Informationsbereitstellung relevanten Daten, welche im Szenengenerator mit den Eindrücken der realen Umgebung überlagert werden (vgl. z. B. [Pat-04], [Rei-09]). Neben dem Visualisierungsmedium ist das Interaktionsgerät im AR-System eine zweite entscheidende Schnittstelle zum Nutzer. Zur Bestätigung eines Arbeitsschrittes, zur Auswahl einer Funktion im System oder ähnlichem wird das Interaktionsgerät genutzt, um aktiv und in Echtzeit in die Szene eingreifen zu können [Rei-09].

2.2.2.1 Visualisierungsmedium

Bei der Konzeptionierung eines AR-Systems existieren verschiedene Möglichkeiten zur visuellen Darstellung der Szene. Die Visualisierungsmedien lassen sich im Wesentlichen in stationäre und mobile Systeme unterteilen. Je nach Einsatzgebiet können beide Systeme Vorteile gegenüber dem anderen aufweisen.

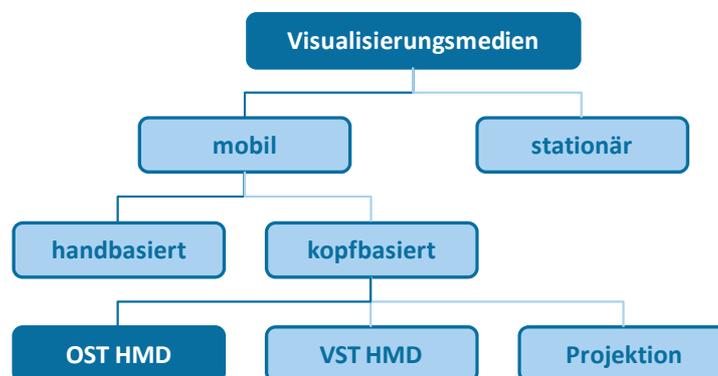


Abbildung 10: Einteilung von Visualisierungsmedien (in Anlehnung an [Rei-09])

In Produktions- und Logistikprozessen (z. B. Kommissionierung) sind die relevanten Informationen oftmals direkt am Ort der Tätigkeit erforderlich, wodurch mobile Systeme zur Visualisierung der relevanten Informationen (z. B. Lagerplatz, Entnahmemenge etc.) verwendet werden. Prozessrelevante Daten können jedoch auch über stationäre, nicht am Körper tragbare Monitore angezeigt werden. In der manuellen Montage finden so nicht selten stationäre Informationsterminals direkt am Arbeitsplatz Anwendung. Ein Vorteil gegenüber mobilen Systemen liegt dabei darin, dass eine gleichzeitige Nutzung des Systems durch mehrere Personen möglich ist,

die Reichweite der Informationsbereitstellung ist jedoch auf die nahe Umgebung des Bildschirms beschränkt [Sas-08].

Mobile Systeme können nach [Rei-09] zudem in hand- und kopfbasierte Visualisierungsmedien unterteilt werden. Bei handgetragenen Displays ist der Nutzer in seiner Flexibilität eingeschränkt und hat nur noch eine Hand zur Aufgabenausführung zur Verfügung. Dieser Nachteil entfällt bei kopfbasierten Systemen, sog. Datenbrillen oder head-mounted Displays (HMD). Bei der Verwendung eines head-mounted-Displays, welches das häufigste visuelle Ausgabemedium bei AR-Anwendungen ist [Pat-04], werden die virtuellen Informationen direkt im Sichtfeld des Nutzers eingeblendet. Die bildgebenden Bestandteile sind dabei in Helme, Mützen oder Brillengestelle eingebaut und individuell auf den Nutzer einzustellen [Mel-96]. HMD werden vom Nutzer passiv getragen und sind daher für mobile Anwendungen in Produktion und Logistik wie bspw. Service- und Montagetätigkeiten besonders gut geeignet [Sas-08]. Die Schwierigkeit von getragenen AR-Systemen liegt darin, den Abgleich zwischen Realität und Virtualität glaubhaft zu gestalten. Die kopfgetragenen AR-Systeme stellen daher eine der schwierigsten AR-Realisierungen dar, da der Nutzer nie außer Acht gelassen werden darf. Aus dieser Problematik heraus haben sich zwei Arten von HMDs entwickelt, Optical see-through (OST) und Video see-through (VST) Systeme (vgl. z. B. [Str-02]). Zudem können Projektionen zu den kopfbasierten Visualisierungsmedien gezählt werden.

Bei den OST-Systemen (auch: see-through oder Durchsicht HMD) werden halbtransparente Spiegel eingesetzt. Der Nutzer kann dadurch die reale Umwelt durch seine Datenbrille hindurch sehen, die virtuellen Objekte werden optisch über einen Bildteiler eingeblendet und der Realität überlagert (vgl. Abbildung 11). Mit dieser Methode wird dem Nutzer der freie Blick auf die echte Umgebung nicht vollkommen genommen, sondern lediglich verändert. Je nach Ausführung der Datenbrille wird das Sichtfeld des Nutzers nicht oder lediglich geringfügig beeinträchtigt [Sas-08]. Durch unterschiedliche Projektion auf die jeweiligen Spiegel kann eine Tiefensicht erzeugt werden, so dass sich die virtuellen Objekte dreidimensional in das Sichtfeld des Nutzers einfügen. Das neue Objekt erscheint dadurch mit einer gegebenen Tiefe in der realen Szene [Str-02]. Die Überlagerung der Zusatzinformationen mit der Realität erfolgt somit direkt im Auge des Nutzers [Alt-03]. Eine starke Reduktion des

Umgebungslichtes stellt das größte Problem dieser Datenbrillen dar ([Sas-08], [Str-02]).

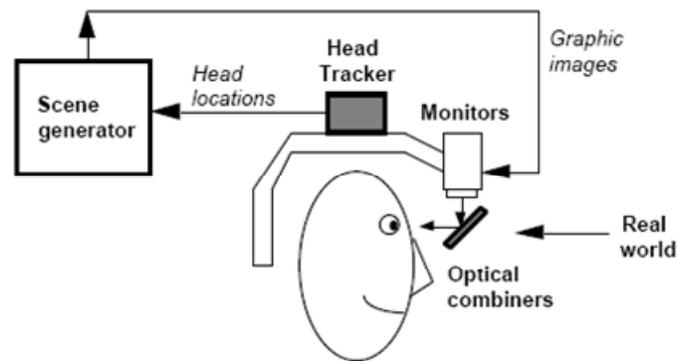


Abbildung 11: Optical see-through HMD – Funktionsprinzip [Azu-97]

Bei der Verwendung von Video see-through HMD (VST) sieht der Nutzer die Umgebung auf einem Bildschirm in einem Helm oder ähnlichem Träger, die Sicht auf das reale Umfeld ist vollständig geschlossen. Die Projektion der Umgebung basiert dabei auf der Aufnahme einer Videokamera, welche in Augenhöhe am Trägergestell (Helm, Brille etc.) befestigt ist (vgl. Abbildung 12). Der Nutzer kann die Realität somit lediglich durch seinen Bildschirm wahrnehmen [Pat-04]. Bei der Fusion der echten Umgebung und den virtuellen Informationen werden die digital gespeicherten Kamerabilder mit den entsprechenden virtuellen Bildern angereichert [Str-02]. Der Nutzer sieht somit ein um die virtuellen Objekte angereichertes Echtzeitvideo seiner Umwelt [Rei-09].

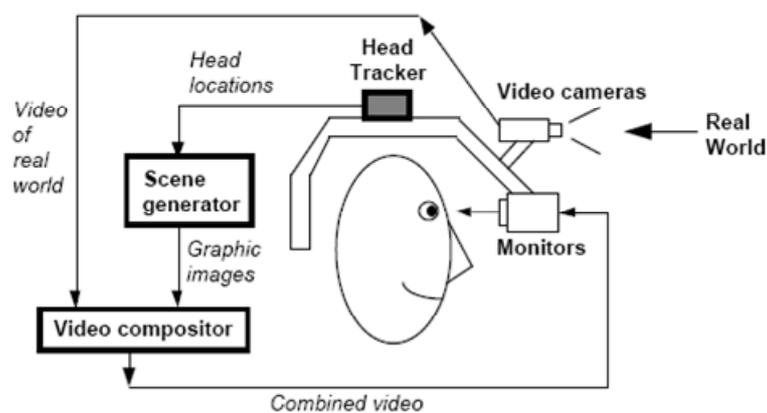


Abbildung 12: Video see-through HMD - Funktionsprinzip [Azu-97]

Im Video-Modus können Details einer Szene vergrößert werden, was in Anwendungsgebieten wie bspw. der Medizin von großem Nutzen sein kann [Wei-99]. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass die Umgebung trotz hoher Darstellungsquali-

tät nicht mehr direkt und natürlich wahrgenommen wird [Str-02] und der Nutzer bei einem Systemausfall praktisch blind ist [Sas-08].

Im Vergleich der beiden head-mounted Display Varianten wirkt sich bei den OST-Systemen oftmals nachteilig aus, dass sich die exakte Kombination von realen und virtuellen Objekten sehr viel schwieriger gestaltet als bei VST-Systemen. Des Weiteren können schnelle Kopfbewegungen zu Verzögerungen in der Darstellung des virtuellen Inhalts führen, welche störend auf den Nutzer wirken können [Str-02]. Die zeitliche Verzerrung wird auch als Latenzzeit bezeichnet [Pat-04]. Als Nachteil der VST-Systeme ist das Gewicht zu nennen, da die entsprechenden HMD schwerer und daher meist unkomfortabler sind als die Datenbrillen bei OST-Systemen. Zudem kommt es häufig zu einer verzögerten Darstellung der bearbeiteten Bildaufnahme der Kameras. Tabelle 2 fasst die Vor- und Nachteile beider Systeme zusammen.

Optical see-through		Video see-through	
+	Lediglich ein (virtueller) Videostrom	-	Synchronisation von zwei Videoströmen
+	Keine Auflösungsverluste beim Realbildanteil	-	Beschränkte Auflösung der realen Umgebung und virtuellen Daten
+	Hohe Sicherheit im Produktionsumfeld aufgrund einer geringen Verdeckung der Umgebung	-	Keine Sicherheit bei Systemausfall, starke Verdeckung der Umgebung, Cyber Sickness möglich
-	Verzögerung bei der Darstellung des virtuellen Inhalts	-	Verzögerungen bei der Darstellung der gesamten Szene
-	Anfälligkeit auf Lichteinflüsse	+	Lichteinflüsse ausschaltbar
-	Beschränktes Field of View (Display) (bis zu 70° horizontal)	+	Großes Field of View (Display) (bis zu 120° horizontal)
-	Hoher Kalibrationsaufwand (Auge/Display) bei hoher erforderlicher Genauigkeit	+	Einmaliger Kalibrationsaufwand

Tabelle 2: Vergleich zwischen OST- und VST-Systemen

In Ergänzung zu Optical und Video see-through HMD stellt die Projektion eine weitere Art der mobilen, kopfbasierten Visualisierung dar. Dabei wird mit einem drehbaren Spiegel ein Bild an eine beliebige Stelle im Raum projiziert, wodurch mehrere Beobachter die Szene gleichzeitig und ohne perspektivische Verzerrung verfolgen können. ([Rei-09], [Sut- 06])

2.2.2.2 Trackingsystem

Die wichtigste Anforderung an ein AR-System ist in den meisten Fällen die Positionierung der realen und virtuellen Objekte zueinander. Diese Aufgabe wird durch das Trackingsystem realisiert. Der Begriff Tracking (dt. Spurbildung, Verfolgen) umfasst alle Bearbeitungsschritte, die zur Verfolgung von Position und Orientierung eines (bewegten) Objektes zu jeder Zeit dienen. Die Ziele des Trackingsystems sind demnach die Extraktion von Informationen über den Verlauf der Bewegung und die Lage eines Objektes sowie die Verminderung von Abweichungen (relative Fehlerdaten), welche sich meist auf zufällige technische Messfehler oder physikalisches Messrauschen zurückführen lassen [Bau-07]. Die Genauigkeit der bestimmten Lage- und Bewegungsinformation hängt neben dem verwendeten Tracking-Algorithmus auch von der Genauigkeit der Beobachtung ab. Für die kombinierte Darstellung von realen und virtuellen Objekten ist es unerlässlich, diese entsprechend den geometrischen Gegebenheiten richtig aneinander auszurichten. Durch das Tracking wird bestimmt, von wo und aus welchem Blickwinkel die AR-Szene betrachtet wird. So wird jedem Objekt ein eigenes Koordinatensystem zugewiesen (vgl. Abbildung 13), dessen Ausrichtung zu einem fixen Weltkoordinatensystem (Welt-COS) berechnet wird ([Bau-07], [Rei-09]). Die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung sind vielfältig.

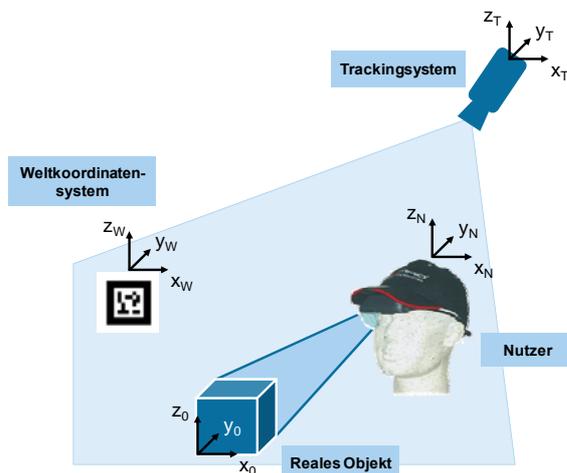


Abbildung 13: Aufbau eines Trackingsystems [Rei-09]

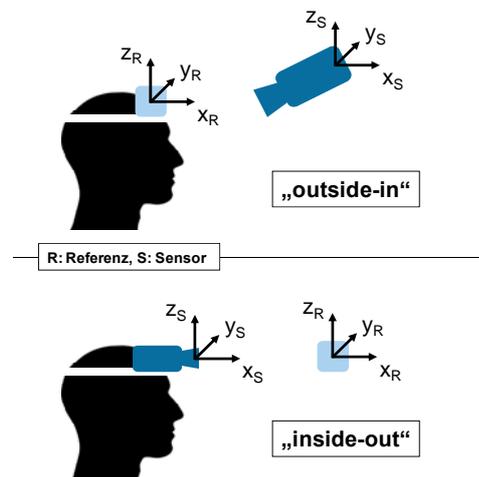


Abbildung 14: Outside-in, inside-out und inside-in Tracking [Rei-09]

Der physische Aufbau der Trackingsysteme lässt analog zu Abbildung 14 eine grobe Einteilung der einzelnen Abwandlungen nach outside-in- bzw. inside-out-Systemen zu. Bei outside-in-Systemen stehen die Sensoren (Kameras) an einer festen Position

zum Weltkoordinatensystem, die Referenzen (Targets) bewegen sich dabei im Raum. Beim inside-out-Tracking bewegen sich die Sensoren zum Welt-COS und die Referenzen befinden sich in einer festen Position zum Weltkoordinatensystem ([Pat-04], [Rei-09]). Neben einer hohen Beweglichkeit des zu verfolgenden Objektes sowie geringen Investitionskosten haben inside-out-Systeme Vorteile gegenüber outside-in-Verfahren in der hohen Genauigkeit entlang der y- und z-Achse [Pus-08]. Bezüglich der Genauigkeit bei Veränderungen in der Tiefe (x-Achse) sowie der Rotation haben hingegen outside-in-Trackingsysteme Vorteile. Zudem sind diese Systeme durch eine hohe Geschwindigkeit der Positionsbestimmung und Robustheit, d.h. der Aufrechterhaltung der Funktion bei sich verändernden Umgebungseinflüssen, gekennzeichnet [Rei-09].

Bei der Auswahl eines Trackingsystems gilt es neben der geforderten Genauigkeit vor allem, die räumlichen Rahmenbedingungen und die potentielle Verträglichkeit mit anderen, in der Umgebung befindlichen Systemen zu beachten [Han-04]. Für die ortsunabhängige Visualisierung prozessrelevanter Informationen wird im Forschungsprojekt u. a. eine lagegerechte Darstellung der virtuellen Informationen angestrebt. Daraus ergeben sich relativ hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Trackingsystems. Zur Differenzierung der am Markt verfügbaren Trackingsysteme kann des Weiteren das physikalische Grundprinzip der einzelnen Verfahren herangezogen werden, wobei zudem eine Einteilung in Grob- und Feintracking vorgenommen werden kann ([Alt-03], [Sas-08]). Obgleich akustische (ultraschallbasierte) Trackingsysteme sowie Inertialsensorik eine mobile Anwendung unterstützen, weisen diese beiden Verfahren teils starke Einschränkungen in der Genauigkeit der Positionsbestimmung auf, sodass sie als alleinstehende Lösungen im Forschungsprojekt keine Anwendung finden ([Rol-08], [Lan-02]). Ähnliche Defizite sind bei Funksystemen (GPS, WLAN, RFID) festzustellen, welche lediglich zum Grobtracking dienen ([Rol-08], [Liu-10]). Weitere Systeme wie die Erzeugung eines elektromagnetischen Feldes durch die Kombination mehrerer Spulen können zwar die Genauigkeit deutlich erhöhen, sind im Vergleich mit anderen Trackingverfahren jedoch geprägt durch eine geringere Robustheit ([Bow-05], [Sut-06]). Mittels mechanischer Verfahren kann mitunter die höchste Genauigkeit erreicht werden [Rol-08], die Systeme sind jedoch aufgrund der physischen Verbindung zum Referenzpunkt für mobile Anwendungen

gänzlich ungeeignet. Aus den genannten Gründen werden im Forschungsprojekt lediglich optische Verfahren zur Positions- und Orientierungserfassung verfolgt, welche sich u. a. aufgrund der hohen Genauigkeit bei AR-Anwendungen etabliert haben. Dabei werden die im betrachteten Wirkungsbereich befindlichen, häufig künstlichen Referenzen (Marker, Targets) von den Aufnahmezonen einer oder mehrerer Kameras erkannt [Wag-05]. Durch das Wissen über Dimension und Orientierung der Marker kann mit Hilfe der aus verschiedenen Positionen aufgenommenen Bilder die räumliche Positionsbestimmung durch Triangulation durchgeführt werden. Den physischen Aufbau betreffend kann hier wiederum nach inside-out- bzw. outside-in-Systemen unterschieden werden.

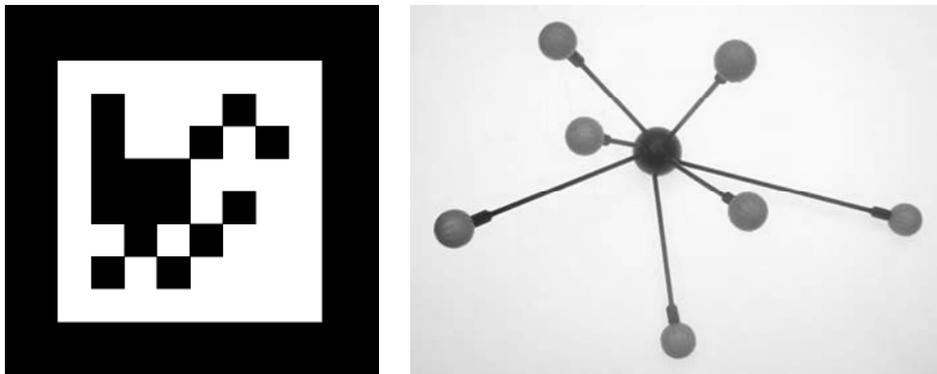


Abbildung 15: Passive Marker/ Targets für Videosysteme (li.) und IR-Systeme (re.) [Rei-09]

Bei optischen inside-out-Trackingverfahren werden im Raum fest montierte Papiermarker durch eine bewegliche, aber mit dem zu trackenden Objekt fest verbundene Kamera erfasst, wodurch auf die Position und Orientierung des Objektes rückgeschlossen wird. Das wohl bekannteste Framework für videobasiertes Markertracking ist das ARToolkit des Human Interface Technology Laboratory (HITL) der University of Washington, welches grundlegende Bibliotheken zur Bildverarbeitung bereitstellt [ATK-10]. Wie für inside-out-Verfahren wurden auch für outside-in-Trackingsysteme in verschiedenen Forschungsprojekten vielfältige Einsatzfelder identifiziert sowie Anwendungen realisiert ([ARV-10a], [ART-10], [AVI-10]). Beispiele für outside-in-Systeme sind infrarotbasierte Trackingverfahren. Dabei wird der zu beobachtende Raum von Infrarotkameras ausgeleuchtet. Diese erkennen mehrere, am Objekt befestigte Targets. Über die Kenntnis der geometrischen Beziehungen der Targets untereinander, wird hier auf die Position und Orientierung des Objektes im Raum rückgeschlossen.

2.2.2.3 Datenhaltungssystem und Szenengenerator

Die über das Trackingsystem gewonnenen Daten zur Position und Orientierung des Objektes werden zur weiteren Aufbereitung an das Datenhaltungssystem und den Szenengenerator weitergegeben. Das Datenhaltungssystem, welches sämtliche prozessrelevanten Informationen enthält, liefert auf Basis dessen situationsgerecht die erforderlichen Daten an den Szenengenerator. Dieser erzeugt aus den Positions- und Orientierungsdaten sowie den vom Datenhaltungssystem gelieferten Daten das entsprechende virtuelle Objekt und integriert dieses räumlich sowie zeitlich korrekt in die reale Szene. Dadurch kann die virtuelle Information in der für den Nutzer richtigen Perspektive visualisiert werden. (vgl. z. B. [Alt-03], [Rei-09])

Die Datenhaltung basiert in der vorliegenden Arbeit auf der RFID-Technologie. Durch ein hybrides System aus zentraler und dezentraler Datenhaltung können Mitarbeiter in den verfolgten Einsatzgebieten aus Produktion und Logistik stets mit den für die aktuelle Arbeitsaufgabe relevanten Informationen versorgt werden. Der detaillierte Aufbau des Datenhaltungssystems kann Kapitel 5.3.2.3, „Entwicklung des Datenhaltungskonzepte“ entnommen werden.

2.2.2.4 Interaktion

In der Literatur wird das Interaktionsgerät häufig nicht als eine Komponente von AR-Systemen aufgezählt. Als direkte Schnittstelle zum Nutzer ist das Medium meist erforderlich, um mit dem System zu kommunizieren und die Visualisierung der Prozessinformationen zu steuern. Um eine möglichst hohe Nutzerakzeptanz zu erreichen, gilt es daher, die Interaktionen mit dem System möglichst exakt auf die Anwendung abzustimmen und eine intuitive Handhabung der Geräte zu gewährleisten [Bow-01]. Typische Aufgaben des Interaktionssystems können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Navigation
- Selektion und Manipulation der virtuellen Inhalte
- Konfiguration und Steuerung der gesamten AR-Anwendung

Die Gewichtung der einzelnen Kategorien hängt stark von der jeweiligen Art der Anwendung ab, nicht selten entfallen Aufgabenbereiche des Interaktionssystems. Die Interaktion in der AR-Umgebung kann – wie die Anwendung selbst – näher an der

Realität oder näher an der Virtualität angesiedelt sein. In einer Studie gelangen Mason et al. zu dem Ergebnis, dass eine haptische Rückmeldung essenziell für effektives Interagieren in Mixed-Reality Umgebungen ist [Mas-01]. Die Bandbreite der möglichen Interaktionsmedien ist groß, wobei klassische Eingabemedien wie Tastatur und Maus besonders in mobilen AR-Systemen nicht zielführend einzusetzen sind. Datenhandschuhe sind zudem meist nur in VR-Anwendungen zu finden. Die Sprache als Interaktionsmedium bietet hingegen die großen Vorteile, dass der Nutzer in der Betrachtung der AR-Szene nicht beeinträchtigt wird sowie beide Hände zur freien Verfügung stehen. Allerdings haben auch sprachgesteuerte Interaktionssysteme Nachteile bzgl. Anfälligkeit auf Umgebungsgeräusche, Fehlinterpretationen, eingeschränkte Kommunikation mit Kollegen etc. Die Sprache kann jedoch sehr gut ergänzend eingesetzt werden [Bow-01].

Im Idealfall ist das Interaktionsmedium direkt in der AR-Szene integriert, so dass die intuitive und effektive Bedienung sichergestellt ist. Für verschiedene Anwendungen – wie auch in der vorliegenden Arbeit – wird weiterhin gefordert, dass die Hände des Nutzers für manuelle Tätigkeiten frei bleiben.

2.3 Produktion und Logistik

In der vorliegenden Arbeit werden Konzepte zur flexiblen Bereitstellung und Nutzung prozessrelevanter Informationen in Produktion und Logistik entwickelt und umgesetzt. Beide Unternehmensbereiche finden sich in den ausgewählten Einsatzszenarien (vgl. Kapitel 3.1.2, „Bewertung und Auswahl der Einsatzszenarien“) wieder, wobei im speziellen die manuelle Montage sowie die montagenahe Kommissionierung thematisiert werden.

2.3.1 (Manuelle) Montage

2.3.1.1 Definition und Einordnung der Montage

Die Montage verfolgt das Ziel, in einer bestimmten Zeit aus einzelnen Teilen bzw. Baugruppen ein Produkt höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen zusammenzubauen, wobei die einzelnen Vorgänge sowohl manuell als auch automa-

tisch durchgeführt werden können (vgl. z. B. [Eve-96], [Rei-06]). In der Prozesskette folgt die Montage der vorgelagerten (Einzelteil-)Fertigung. Zur Durchführung der Montage müssen einerseits die für den jeweiligen Montagevorgang benötigten Teile und andererseits die zur Bearbeitung notwendigen Informationen bspw. aus Konstruktion und Arbeitsvorbereitung termingerecht bereitgestellt werden. Nach [Vie-00] definiert sich die Montage durch den Aufbau von Maschinen aus Baugruppen und/oder Teilen am Montageort, den Anschluss aller Medien, die Teilerprobung sowie den erforderlichen innerbetrieblichen Transport [Vie-00]. Bei sämtlichen Definitionen in der Literatur nimmt die Informationsbereitstellung stets einen wesentlichen Anteil bei der Durchführung der Montage ein.

Das Montieren wird häufig in einem Atemzug mit dem Fügen genannt. Die beiden Begriffe sind nach [DIN8593-0] jedoch nicht gleichzusetzen, da das Montieren zwar stets unter Anwendung von Fügeverfahren durchgeführt wird, zusätzlich jedoch auch alle Handhabungs- und Hilfsvorgänge einschließlich des Messens und Prüfens umfasst. Des Weiteren umfasst das Fügen zusätzlich Fertigungsverfahren, welche nicht im Zusammenhang mit Montieren angewendet werden (z. B. Verseilen, Einvulkanisieren, Ummanteln) [DIN8593-0].

2.3.1.2 Montagestrukturen und -tätigkeiten

Da weitreichende Verbesserungen in der Montage meist mit strukturellen Veränderungen (gerichteter Materialfluss, klare Definitionen der Montagebereiche, Festlegung von Kompetenzbereichen etc.) verbunden sind, gilt es zunächst verschiedene Strukturen innerhalb der Montage gegeneinander abzugrenzen. Nach [Eve-89] können dazu die Montagestrukturtypen nach Produkt-, Materialfluss-, Personalqualifikations-, Organisationsform-, Betriebsmittel- und Produktstrukturorientierung unterschieden werden. Um die spezifischen Vorteile der einzelnen Strukturtypen zu vereinen, sind in der Praxis jedoch häufig Mischformen erforderlich [Eve-89].

- Produktorientierung: Mehrere Produktgruppen in hohen Stückzahlen
- Materialflussorientierung: Unterschiedliche Produkte mit vergleichbaren technologischen bzw. ablaufbedingten Anforderungen
- Personalqualifikationsorientierung: Vormontierte Baugruppen stellen grundsätzlich unterschiedliche Anforderungen an die Personalqualifikation

- Organisationsformorientierung: Hohe Stückzahl von montagetechnisch ähnlichen Baugruppen
- Betriebsmittellorientierung: Teure und ortsgebundene Betriebsmittel
- Produktstrukturorientierung: Montagegerecht aufgebaute Produktstruktur

Zur Montage von Produkten oder Baugruppen ist in der Regel eine Vielzahl an Tätigkeiten notwendig, die sich entsprechend ihrer Funktion in Haupt- und Nebenfunktionen gliedern lassen [Eve-96]. Als Hauptfunktionen werden in diesem Zusammenhang die Tätigkeiten bezeichnet, welche einen sichtbaren Arbeitsfortschritt zur Folge haben. Innerhalb der Montage entspricht dies im Wesentlichen dem Fügen, wobei die nicht mit der Montage in Zusammenhang stehenden Fertigungsverfahren ausgeschlossen sind ([DIN8593-0], [Eve-96]). Um die Hauptfunktionen innerhalb der Montage zu erfüllen, bedarf es verschiedener Nebenfunktionen. Dazu lassen sich nach [Eve-96] folgende Bereiche unterscheiden:

- Lagern (Einlagern, Verwalten etc.),
- Transportieren (Aufnehmen, Fahren etc.),
- Handhaben (Speichern, Bewegen, Positionieren etc.),
- Anpassen (z. B. Nacharbeiten) und
- Kontrollieren (Prüfen, Messen etc.).

[Lot-92] unterscheidet in seiner Methodik zur Ermittlung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades von Montagekonzepten zwischen Primär- (PMV) und Sekundärmontagevorgängen (SMV). Zu dem PMV sind alle Vorgänge zu zählen, „die der Wertschöpfung eines Produktes während seines Montagevorganges dienen“ [Lot-92]. Darunter fallen sämtliche Aufwendungen an Energie, Information und Teilen zur Vervollständigung eines Produktes. SMV sind die notwendigen sekundären Aufwendungen an Zeit, Information und Energie, die keine Wertschöpfung des Produktes bewirken. [Rad-99] teilt die in der Montage anfallenden Tätigkeiten in drei Blöcke auf, die sich allerdings wesentlich von den zuvor beschriebenen Untergliederungen unterscheiden. Den Haupttätigkeiten in der eigentlichen Montage (Fertigen inkl. Fügen, Handhaben, Anpassen, Umrüsten und Zusatztätigkeiten) stehen Vor- bzw. Nachgeschaltete Tätigkeiten vor Beginn bzw. nach Ende der eigentlichen Montage gegenüber. Diese umfassen neben dem Auf-/ Abrüsten der Maschinen auch das Fördern bzw.

Lagern der Objekte. Parallel dazu werden während der gesamten Auftragsbearbeitung zusätzlich begleitende Tätigkeiten durchgeführt. Dazu zählen das Kontrollieren, Instandhalten und sämtliche Tätigkeiten zur Informationsverarbeitung.

2.3.1.3 Manuelle Montage

Der Einsatz von automatischen Montageanlagen zur Reduktion der Montagestückkosten scheidet häufig am Risiko einer Fehlinvestition in automatische Anlagen für Produkte, deren Absatz in naher Zukunft bereits zurückzugehen droht [Rad-99]. Zudem erschweren verschiedene Anforderungen hinsichtlich kurzer Produktlebenszyklen, hoher Variantenzahl bei kleinen Losgrößen oder produktspezifischen Montage-techniken die Entscheidung für ein automatisiertes Montagesystem, welches durch einen hohen technischen Aufwand gekennzeichnet ist (vgl. z. B. [Lot-92], [Wil-01]). Vor allem die erforderliche hohe Flexibilität der Montageeinrichtungen verhindert in vielen Fällen den wirtschaftlichen Einsatz von automatisierten Montagesystemen und unterstreicht die Bedeutung der manuellen Montage. Nach [Rad-99] darf „der teure Produktionsfaktor Mensch nicht wie bisher nur als kostengünstiger Handhabungsautomat eingesetzt werden“, vielmehr muss der Mitarbeiter mit seinen Fähigkeiten und seinem Wissen in den gesamten Produktions- und Informationsprozess eingebunden werden.

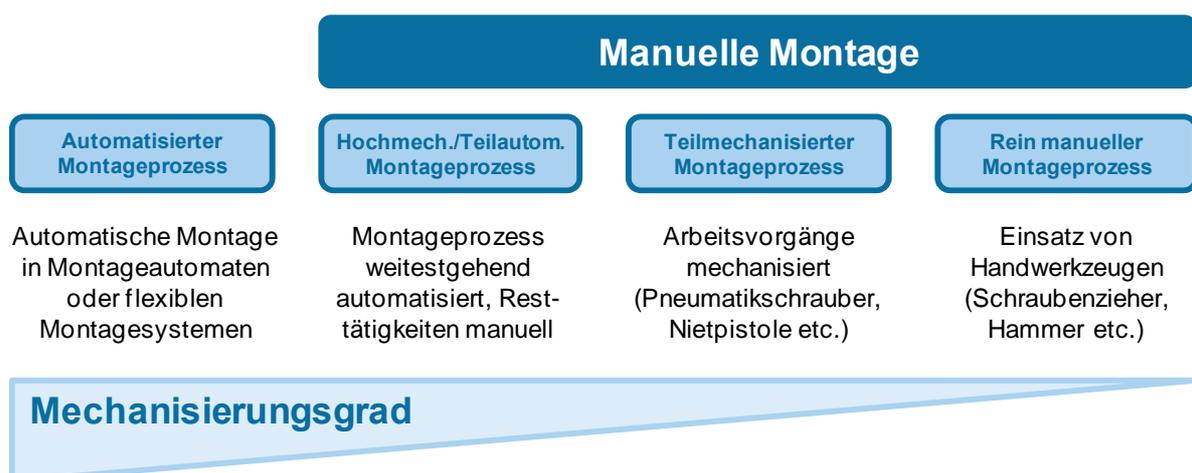


Abbildung 16: Einordnung der manuellen Montage (vgl. [Beu-81])

Demnach führt der Mitarbeiter bei der manuellen Montage die Montagetätigkeit durch den Einsatz seiner Hände bzw. seiner Fingerfertigkeit, Sinnesorgane und Intelligenz unter Inanspruchnahme von Hilfsmitteln aus. Dabei spielt die Gestaltung der

Arbeitsplätze eine wesentliche Rolle, um die menschliche Arbeitsleistung zu erhalten und die Arbeit zu erleichtern [Lot-92]. Durch die Differenzierung der Montage hinsichtlich der Mechanisierung lässt sich die manuelle Montage gegenüber teilmechanisierter, teilautomatisierten bzw. automatisierter Montagesysteme abgrenzen (vgl. z. B. [Beu-81]). Innerhalb der manuellen Montage werden Montagevorrichtungen ausschließlich bzw. überwiegend vom Menschen bedient [Wil-01]. Auch [Rei-06] unterscheidet Montagesysteme hinsichtlich des Grades menschlichen Eingriffs nach manuellen, mechanisierten und automatisierten Montagesystemen. Bei der manuellen Montage wird der Montageprozess ohne den Einsatz von mechanisierten und automatisierten Komponenten grundsätzlich vom Menschen durchgeführt. Mechanisierten Systemen werden unter Zuhilfenahme mechanisierter Komponenten ebenfalls vom Menschen gesteuert, während automatisierte Systeme von technischen Systemen gelenkt werden. Bei hybriden Systemen ist ein Teil des Gesamtsystems automatisiert.

Die Gründe für einen Einsatz der manuellen Montage gliedert [Rad-99] nach produkt- und absatzbedingten Aspekten. Demnach begünstigen sowohl kleine, geplante Produktionsstückzahlen, aber auch kurze Produktlebenszyklen bzw. saisonale Absatzspitzen den Einsatz einer manuellen Montage. Produktbedingte Automatisierungshemmnisse sind häufig in komplexen Montageprozessen, schwer automatisch handhabbaren Werkstücken oder Einstell- und Prüfvorgängen zu finden, in denen subjektive Merkmale zu kontrollieren sind.

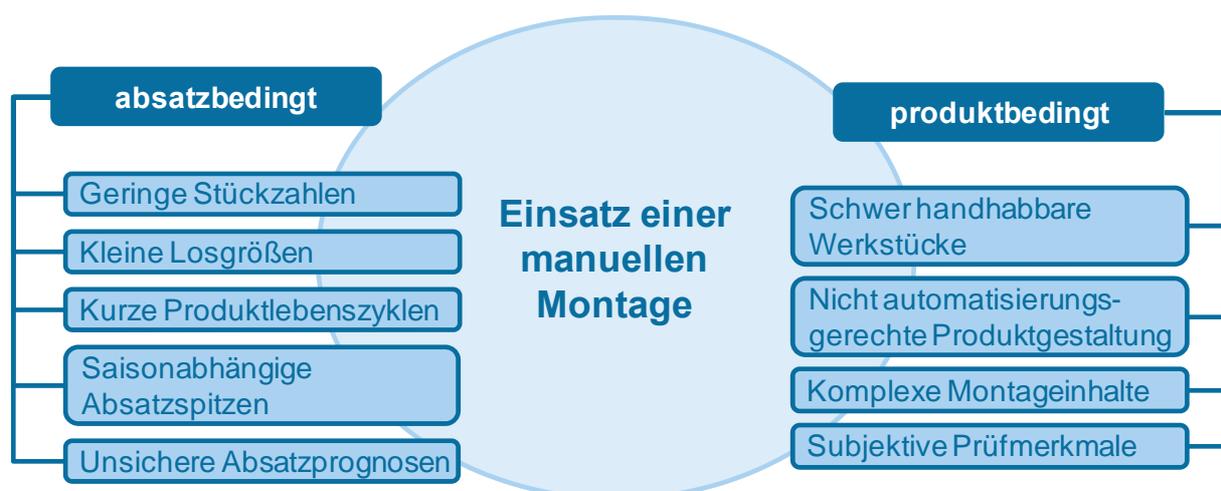


Abbildung 17: Gründe für den Einsatz einer manuellen Montage (vgl. [Rad-99])

2.3.1.4 Organisationsformen in der manuellen Montage

Die Auswahl der Organisationsform richtet sich bei der manuellen Montage im Wesentlichen nach der Größe und Komplexität des Produktes, dem Schwierigkeitsgrad der Montage und dem Produktionsvolumen [Lot-92]. Die am häufigsten verwendeten Organisationsformen in der manuellen Montage sind nach [Lot-92] die Einzelplatz- und die Fließmontage. Die Einzelplatzmontage findet meist bei Produkten mit beschränkter Komplexität und Losgrößen Anwendung und bietet Vorteile hinsichtlich der Flexibilität bzw. der Vermeidung einer direkten Auswirkung von Störungen auf andere Arbeitsplätze. Werden mehrere Einzelplätze zu einer Linie verkettet, spricht man von Fließmontage. Diese wird dann eingesetzt, wenn aufgrund der Produktkomplexität bzw. einem dem Produktionsvolumen pro Zeiteinheit eine wirtschaftliche Montage an Einzelplätzen nicht mehr möglich ist.

Nach [Rad-99] wird die losgrößenorientierte Fertigung zunehmend von dem Gedanken der „Mixed Production“ abgelöst. Steigende Eigenverantwortung, dezentrale Strukturen, Informationsmanagement oder Arbeitszeitmodelle sind nur einige Begriffe, die den Wandel der Arbeitsorganisation in der manuellen Montage charakterisieren. Dabei werden dem Mitarbeiter auch immer häufiger dispositive Aufgaben zuteil. Dies ermöglicht dem Werker beispielsweise, die Montageaufgaben innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters eigenverantwortlich abzuarbeiten. [Eve-96] unterscheidet die Organisationsformen in der Montage nach bewegten bzw. stationären Arbeitsplätzen und Montageobjekten.

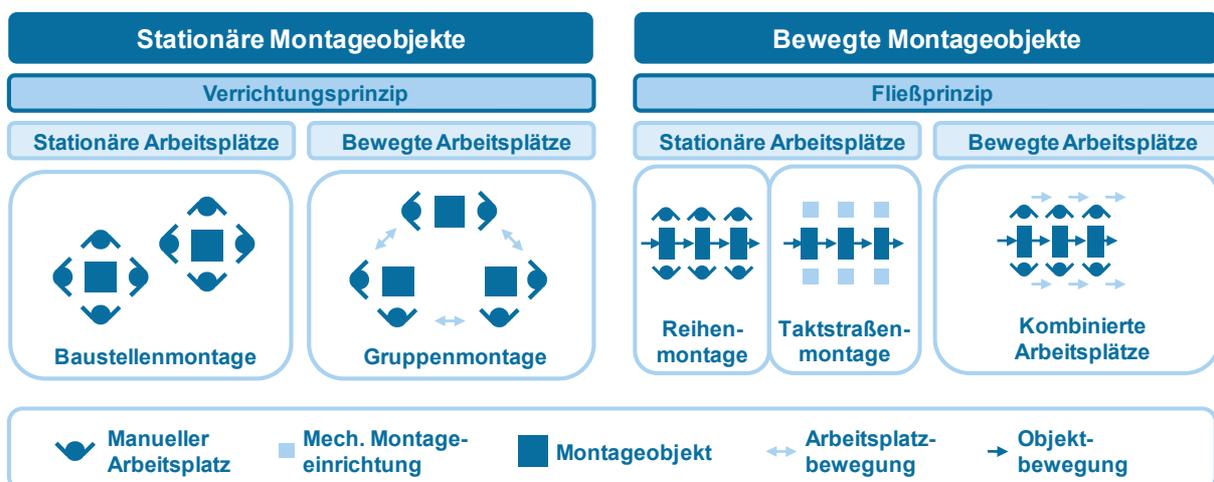


Abbildung 18: Organisationsformen in der Montage (vgl. [Eve-96])

Innerhalb der Baustellenmontage bleiben Montageobjekt und Arbeitsplatz stationär. Diese Organisationsform findet vorwiegend bei großen Montageobjekten Anwendung und ist gekennzeichnet durch universale Fähigkeiten der Mitarbeiter. (Periodisch) Bewegte Arbeitsplätze bei gleichzeitig stationären Montageobjekten sind charakteristisch für die Gruppenmontage, welche hauptsächlich bei Produkten eingesetzt wird, die nicht transportiert werden können und das spezifische Know-how hochqualifizierter Spezialisten erfordern. Bei der Fließmontage wandert das Montageobjekt von einem Arbeitsplatz zum nächsten. Hierbei ist eine Unterscheidung nach dem Einsatz manueller oder mechanischer Arbeitsstationen bzw. nach der Taktung möglich. Bei der kombinierten Fließmontage sind sowohl Montageobjekt als auch Arbeitsplatz beweglich. [Eve-96]

In Anlehnung an [Bul-86] erfolgt die Auswahl einer Montagesystemstruktur anhand von vier Kriterien. Die Organisationsform wird analog zu der von [Eve-96] beschriebenen Aufteilung ausgewählt. Hinzu kommen die Arbeitsplatzanordnung (Einzelarbeitsplatz, X-Block, Hauptfluss oder Nebenfluss), die Verkettung (wahlfrei, Ringstruktur oder Linienstruktur) und die Pufferart (Linien-, Flächen-, Regal- oder Umlaufpuffer).

2.3.1.5 Strukturierung montagespezifischer Daten

Ähnlich der Aufteilung nach [Eve-96] können die elementaren Montageprozesse nach den Hauptfunktionen Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Fördern und Lagern unterteilt werden [Har-93]. Zur Ermittlung montagefunktionsorientierter Daten geht [Har-93] weiter davon aus, dass die Ausführung der einzelnen Montagefunktionen zwangsläufig zu einer Nutzung und damit zu einer Beanspruchung unternehmensinterner Ressourcen bzw. Potenziale führt. Eine weitere Unterteilung der Hauptfunktion in Teilbereiche und die daraus resultierende Definition sogenannter Bilanzhüllen ermöglicht eine systematische und vollständige Datenermittlung. Die Teilbereiche werden für jede Hauptfunktion mit den vier Bilanzhüllen Teilfunktionen, funktionsbeschreibende Daten, Produktdaten und Prozessdaten beschrieben [Har-93]. Die so zusammengetragenen Daten dienen als Grundlage bei der Ermittlung, Aufbereitung und systematischen Ablage der Daten im Forschungsprojekt und werden daher in Anhang A abgelegt.

2.3.2 Montagenahe Kommissionierung

2.3.2.1 Grundfunktionen eines Kommissioniersystems

Nach [VDI3590] ist ein Kommissioniersystem durch die „Zusammenstellung von Teilmengen aufgrund von Anforderungen (Aufträgen) aus einer Gesamtmenge (Sortiment)“ definiert. Die Grundfunktionen des Kommissioniersystems lassen sich demnach mit folgenden Elementen zusammenfassen:

- Transport der Güter zum Bereitstellort
- Bereitstellung der Güter
- Bewegung des Kommissionierers zum Bereitstellort
- Vorgabe der Entnahmeinformation
- Entnahme der Entnahmeeinheiten durch den Kommissionierer
- Abgabe der Entnahmeeinheiten
- Quittierung des Entnahmevorgangs
- Transport der Sammeleinheiten zur Abgabe
- Vorgabe der Transportinformation für angebrochene Bereitstelleinheiten
- Transport der angebrochenen Bereitstelleinheit

Ergänzend zur VDI-Richtlinie werden nach [Vog-97] die Funktionen beim Ablauf eines Kommissioniervorgangs in die drei Kategorien Information, Bewegung und Greifen gegliedert (vgl. Abbildung 19).

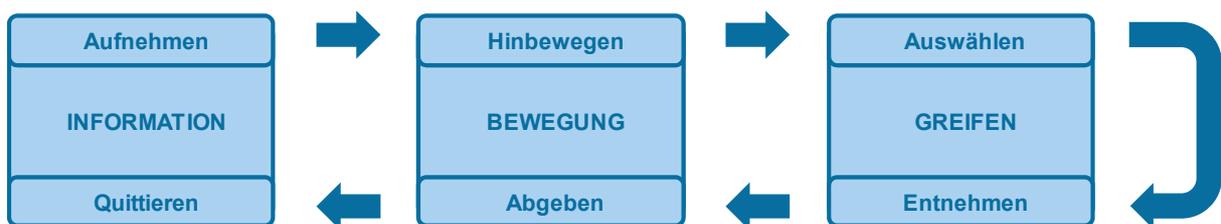


Abbildung 19: Ablauffunktionen beim Kommissioniervorgang [Vog-97]

Für die beleglose Kommissionierung werden nach [VDI3311] folgende (Haupt-) Funktionen bzw. (Haupt-) Tätigkeiten unterschieden: (Ausgangszustand), Anmelden, Rüsten, Anzeigen, Lesen, Fortbewegen, Prüfen, Entnehmen, Ablegen und Abschließen. Hinzu kommen die Nebentätigkeiten Einlagerung/ Nachschub, Bestandskorrekturen, Entfernen des Leerguts, Zeit-/ Leistungserfassung, Nachholen/ Vervollständigen einzelner Positionen und Wechseln der Sammeleinheit.

2.3.2.2 Einteilung eines Kommissioniersystems

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3590, Blatt 1 wird das Kommissioniersystem in die drei Subsysteme Informations-, Materialfluss- und Organisationssystem eingeteilt [VDI3590].

Die zur Kommissionierung notwendigen Elemente des Informationssystems sind die Auftragsabwicklung, die Auftragsaufbereitung, die Weitergabe und die Quittierung (vgl. Abbildung 20). Unter der Auftragserfassung wird in diesem Zusammenhang die Tätigkeit des Mitarbeiters in der montagenahen Kommissionierung verstanden, der zur Erfassung der zu kommissionierenden Artikel erforderlich ist. Die Auftragsaufbereitung umfasst alle administrativen Tätigkeiten nach der Auftragserfassung und vor der Weitergabe des Auftrags wie bspw. das Ordnen oder Aufteilen von Teilaufträgen etc. Im Forschungsprojekt werden an dieser Stelle ebenso wie bei der Weitergabe der Informationen im Wesentlichen die zu visualisierenden Daten definiert. Unter der Quittierung wird die Bestätigung der Entnahme verstanden, welche eventuell mit Informationen zur entnommenen Artikel-Menge, zu abweichenden Entnahmemengen etc. zu ergänzen sind. [VDI3590]

In einer im Vergleich zur VDI-Richtlinie vereinfachten Darstellung setzt sich das Materialflusssystem aus den Teilsystemen Bereitstellen, Fortbewegen, Entnahme und Abgabe zusammen (vgl. Abbildung 20). Die Bereitstellung der Ware kann statisch (Mann zur Ware), oder dynamisch (Ware zum Mann) erfolgen. Bei der eindimensionalen Fortbewegung bewegt sich der Mitarbeiter nur auf einer Höhenebene (bspw. Bodenlager), bewegt sich der Kommissionierer stufenlos über die gesamte vertikale und horizontale Achse, definiert sich seine Fortbewegung als mehrdimensional. Die Entnahme der Ware wird entweder manuell (von Hand) oder automatisch ohne Eingriff des Menschen durchgeführt. Nach Abschluss der Entnahme wird die Ware entweder direkt vom Kommissionierer (zentral) oder über ein Fördersystem (dezentral) zu einer Sammelstelle gebracht. [VDI3590]

Das Organisationssystem teilt sich – in einer ebenfalls vereinfachten Darstellung – in die Grundfunktionen Aufteilen, Abwickeln und Sammeln (vgl. Abbildung 20). Beim Aufteilen (Aufbauorganisation) wird eine Entscheidung über die Anzahl der Zonen getroffen. Bei einer mehrzonigen Organisation existieren bspw. jeweils eigene Zonen für Kühlung und Großteile. Als Beispiel für die mehrstufige Ablauforganisation gilt

das Sammeln von Artikeln für mehrere Aufträge in einem Kommissioniervorgang, wobei die Zuteilung zu den einzelnen Aufträgen erst danach erfolgt. Wird ein Kommissionierauftrag in mehrere Teilaufträge zerlegt, können diese nacheinander oder parallel bearbeitet werden (Betriebsorganisation). [VDI-3590]

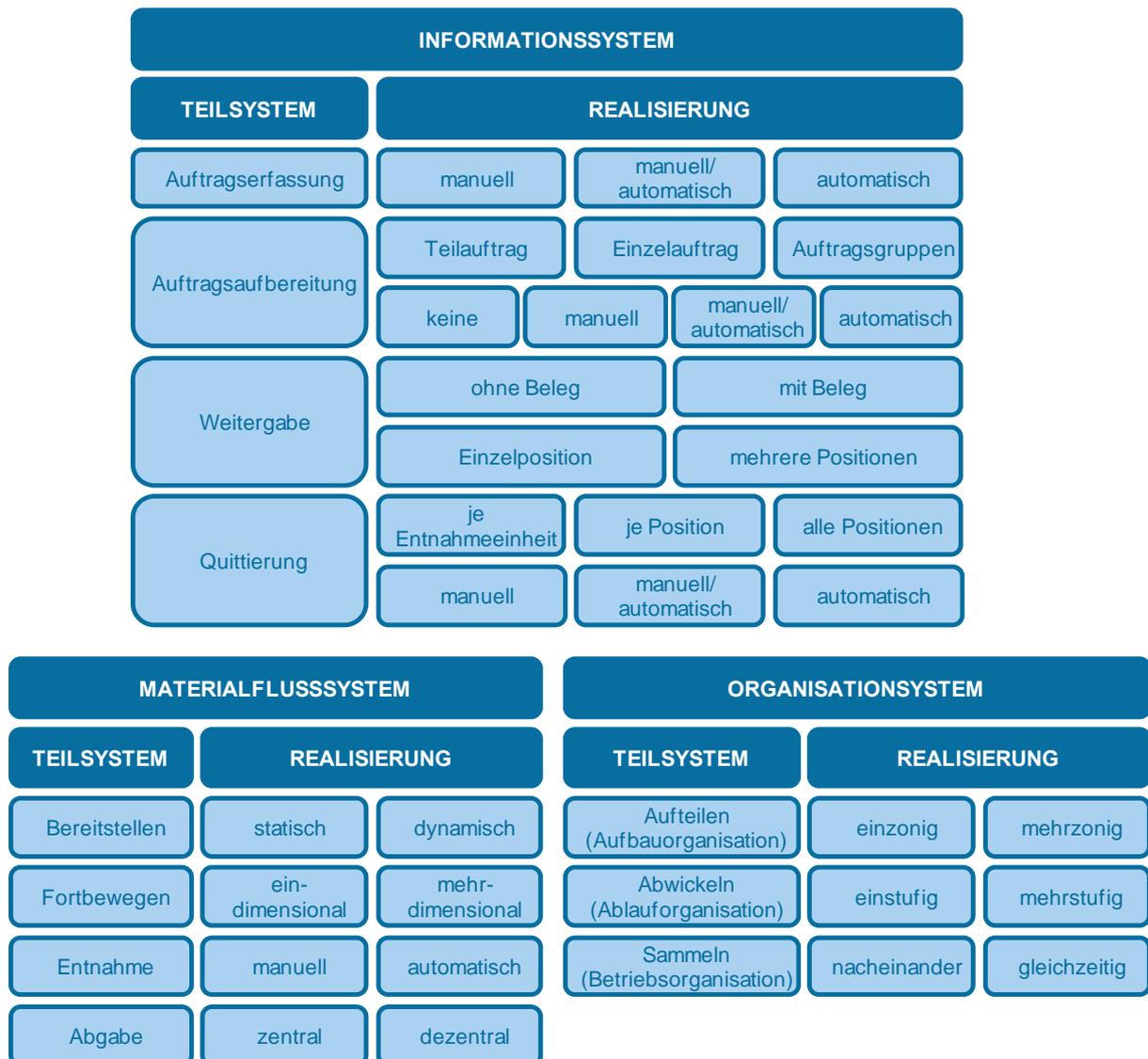


Abbildung 20: Einteilung eines Kommissioniersystems (vgl. [VDI3590])

2.3.2.3 Kommissioniersteuerung

Im Allgemeinen gilt, dass die Vollständigkeit, Lesbarkeit und Anordnung der Informationen großen Einfluss auf die Totzeit und Fehlerquote haben und sich somit direkt auf Kosten, Qualität und Leistung des Kommissioniersystems auswirken [Gud-05]. Für die Übermittlung der für die Entnahme relevanten Informationen können

prinzipiell zwei Verfahren unterschieden werden, die belegbehaftete und beleglose Kommissionierführung (vgl. Abbildung 21).

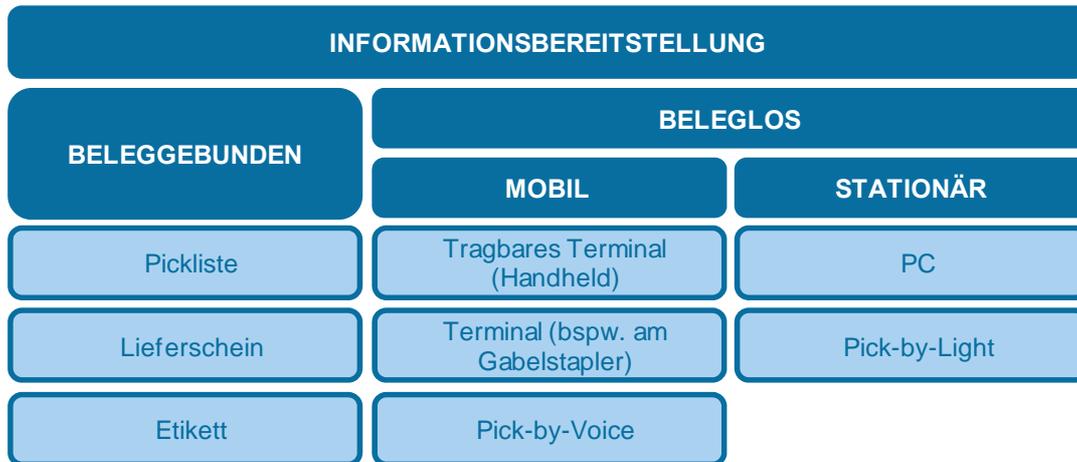


Abbildung 21: Kommissioniersteuerung

Beim Vergleich der Ablaufschritte der beiden Systeme (vgl. Abbildung 22, [VDI3311]) fällt auf, dass für die beleglose Kommissionierung deutlich weniger Prozessschritte anfallen. Es kann jedoch nicht generell bestätigt werden, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit bei beleglosen Systemen niedriger ist [Lol-03]. Zudem muss erwähnt werden, dass die Einführung moderner Kommissioniertechniken nur eine von vielen Maßnahmen zur Reduzierung der Pickfehler ist (Arbeitsabläufe anpassen, Mitarbeiter schulen etc.) [Lol-03]. Nach [Lol-03] gilt in der Kommissionierung die „30 %“-Regelung, d. h. durch beleglose Lagerprozesse kann gegenüber beleggebundenen Systemen die Produktivität bis zu 30% gesteigert und Fehlerwahrscheinlichkeit bis zu 30% gesenkt werden. Dazu müssen jedoch die Strukturen des Kommissioniersystems angepasst und die Technologie von den Mitarbeitern akzeptiert werden. Unabhängig von der eingesetzten Technik sind die Vorteile der beleglosen Kommissionierung nach [VDI3311] nicht nur in der Reduzierung der unproduktiven Zeitanteile und der Qualitätsverbesserung durch die Reduzierung der Fehlerquote zu suchen, sondern auch in der Erhöhung der Flexibilität bspw. bei Eilaufträgen und der Reduzierung der Betriebskosten von Druckern, Papier etc. begründet.

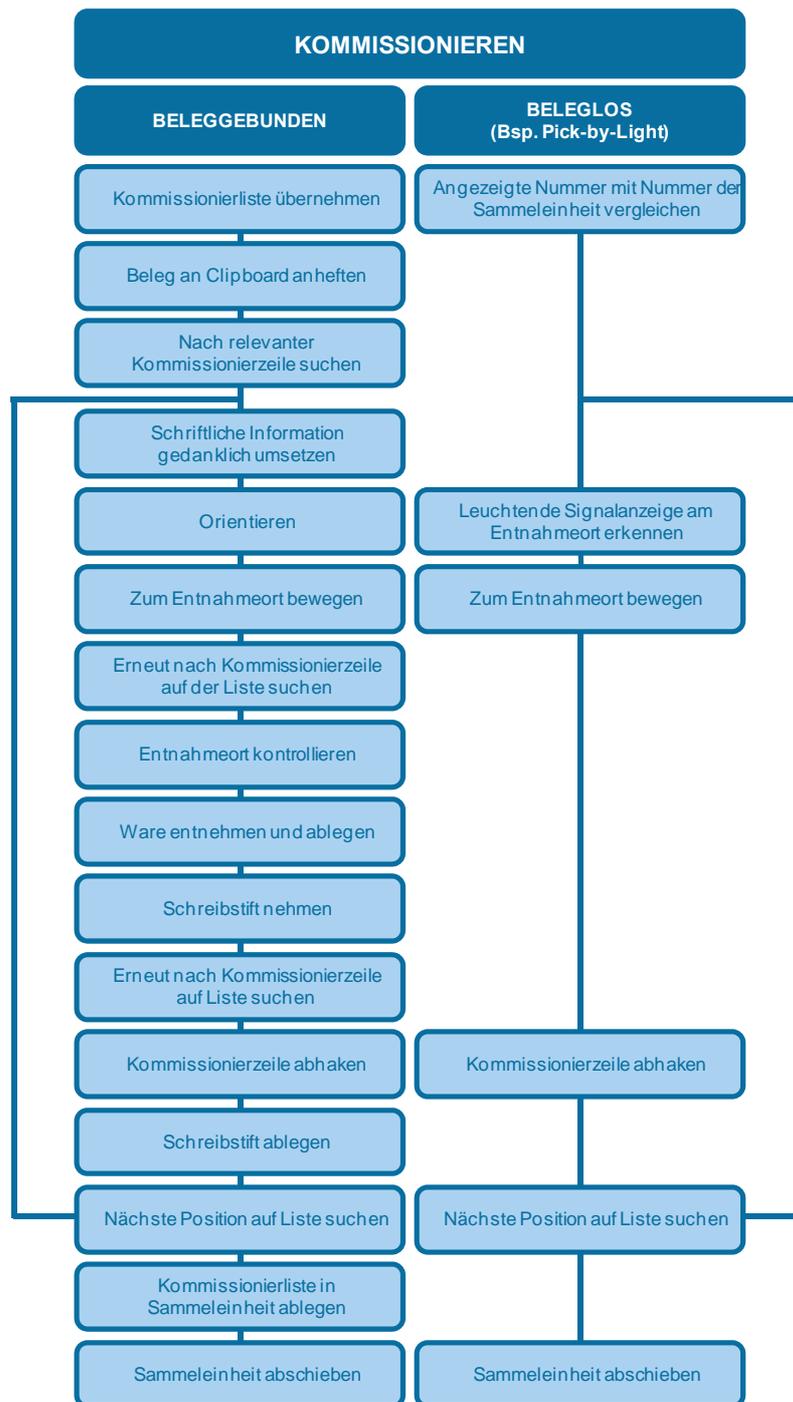


Abbildung 22: Vergleich von beleggebundenem und -losem Kommissionieren [VDI3311]

2.3.2.4 Kommissionierqualität, -fehler und -zeit

Die Qualität in der Kommissionierung wird durch die richtige Ware, die richtige Menge und den richtigen Zustand der Ware bestimmt, während der zeitliche Rahmen (Termintreue) von der übergeordneten dispositiven Ebene (Lagerverwaltung) und der operativen Ebene (Kommissionierung) vorgegeben wird [Lol-03]. In ähnlicher Form definiert auch [Kwi-93] die Kriterien für die Qualität der Kommissionierung mit der

Null-Fehler-Kommissionierung, dem einwandfreien Zustand der Ware und einer kurzen Auftragsdurchlaufzeit. Neben der technischen Funktionsfähigkeit bestimmt auch die menschliche Zuverlässigkeit ganz wesentlich die Qualität der Kommissionierung. Mit Hilfe einer exakten Bedienerführung durch den Einsatz von Multimediasystemen (Bsp.: Pick-by-Light) kann die Prozessgenauigkeit erhöht und auftretende Fehler somit reduziert werden [Dul-05].

Grundsätzlich lassen sich vier Fehlerarten unterscheiden [Gud-05], [Vog-97]. Typfehler entstehen durch die Entnahme aus einer falschen Bereitstellereinheit, die Verwechslung von Artikeln oder der Ablage in einen falschen Auftragsbehälter. Zudem können Mengenfehler durch die Entnahme der falschen Menge, Auslassungsfehler durch das Liegenlassen oder Vergessen einzelner Positionen oder durch eine zu späte Bereitstellung zum Abholen oder Versand sowie Zustandsfehler durch eine mangelhafte Qualität des Objektes oder falsche Etikettierung auftreten. Dabei sind Mengenfehler (44 – 46 %) und Typfehler (37 – 42 %) häufiger wie Auslassungs- (10%) oder Zustandsfehler (4 – 7 %) [Dul-05], [Lol-03]. Zur Einschätzung der Größenordnung für die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Kommissionierfehler existieren mehrere Quellen, welche sich jedoch wenn überhaupt nur geringfügig unterscheiden (vgl. Tabelle 3).

KOMMISSIONIERSYSTEM	ANZAHL SYSTEME	DURCHSCHNITTLICHE FEHLERWAHRSCHEINL.	STANDARD-FEHLER
Pick-by-Voice	5	0,10 %	0,04 %
Beleg	38	0,35 %	0,04 %
Etiketten	7	0,37 %	0,17 %
Pick-by-Light	6	0,40 %	0,09 %
MDE mit Scanner	13	0,36 %	0,10 %
MDE ohne Scanner	6	0,69 %	0,19 %
MDE & Etiketten	5	0,94 %	0,60 %

Tabelle 3: Fehlerquoten in der Kommissionierung [Lol-03]

Die Kommissionierzeit wird in der Literatur meist nach Basiszeit (Übernahme des Auftrags, Abgabe von Ware und Kommissionierbehälter etc.), Greifzeit (Hinlangen, Aufnehmen etc.), Rüst-/ Totzeit (Lesen, Aufreißen von Verpackungen, Suchen und

Identifizieren, Kontrollieren, Reagieren etc.) und Wegzeit (Bewegung zwischen Annahmestelle, Entnahmeort und Abgabestelle) unterteilt (vgl. z. B. [Gud-04], [Lün-05], [ten-04]). Wartezeiten können zudem die Rüstzeiten verlängern. Aufgrund kleiner werdender Auftragsgrößen haben positionsbezogene Zeiten (Weg-, Tot- und Greifzeit) gegenüber der auftragsbezogenen Basiszeit an Bedeutung verloren [Lün-05].

Basiszeit

[Gud-04] versteht unter der Basiszeit die Aufrüstzeit, d. h. die Zeit, die sich der Kommissionierer vor Beginn und nach Abschluss einer Kommissioniererrundfahrt an der Basis aufhält. Zur Basiszeit tragen dementsprechend folgende Vor- und Nachbearbeitungszeiten bei: Die Annahme und Abgabe von Auftragsbelegen, das Ordnen von Pickbelegen nach der Wegstrategie, die Übernahme leerer Sammel- oder Versandbehälter, das Positionieren für die Übernahme und Abgabe, die Abgabe gefüllter Behälter sowie die Zielkodierung und Etikettierung der Behälter. Der Zeitaufwand ist dabei jeweils vom Kommissionierverfahren und der Kommissioniertechnik abhängig. So entfallen bspw. beim beleglosen Kommissionieren die Annahme, das Ordnen und die Abgabe der Pickbelege. [Gud-04]

Greifzeit

Die Greifzeit hängt stark ab von räumlichen Einflussfaktoren des Entnahmeplatzes (maximale und minimale Greifhöhe, mittlere Greiftiefe, mittlere Ablagewinkel, mittlere Ablageentfernung etc.) und weiteren Einflussfaktoren wie der mittleren Entnahmemenge pro Position, dem mittleren Volumen pro Entnahmeeinheit und dem mittleren Gewicht pro Entnahmeeinheit. Die Greifzeit lässt sich zudem in die Teilvorgänge Hinlangen, Aufnehmen, Befördern, Ablegen und Zusatzarbeiten (Ab-/ Zuschneiden, Ab-/ Verwiegen und Ab-/ Vermessen) unterteilen. [Gud-04]

Rüst-/ Totzeit

Totzeiten bei manueller Kommissionierung sind bedingt durch Informationsaufnahme- und Informationsverarbeitungsvorgänge der menschlichen Sinnesorgane und gekennzeichnet durch das Fernbleiben äußerlicher Veränderungen an den Waren [Alt-03]. Totzeiten sind nicht wertschöpfend (z. B. Lese-, Such-, Kontroll-, Reaktionszeiten, Belegarbeiten, Kodieren und Positionieren) und umfassen 20-30% der Kommissionierzeit [Alt-03]. Die Rüstzeit pro Position kann die Vor- und Nachbear-

beitung des Greifvorgangs am Pickplatz bestimmen und umfasst Zeiten für Informationsvorgänge, Zeiten zur Positionierung sowie Zeiten für Handhabungsvorgänge, die zusätzlich zum Greifen anfallen [Gud-04].

Wegzeit

Die Wegzeit ist abhängig von der Kommissionierfront, welche wiederum von der Bereitstelltechnik und bzw. den Bereitstellmitteln abhängig ist, und bestimmt mit 50-70% am stärksten die Kosten der Kommissionierung (vgl. z. B. [Bry-95], [Vog-97]). Die Bereitstellung mit Stichgängen verkürzt die Wegzeit, ab 20 m Laufweg lohnt sich der Einsatz eines Flurförderzeugs. Reduzieren lassen sich die Wegzeiten durch eine optimierte Einlagerungslogistik, durch die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Aufträge und eine Wegoptimierung. [Vog-97]

2.4 Stand der Forschung: Wearable Computing in Produktion und Logistik

Diskussionen um die Unterstützung und Entlastung des Menschen durch Assistenzsysteme im täglichen Leben (Gesundheit, Versorgung, Sicherheit etc.), aber auch in verschiedenen Bereichen des beruflichen Umfeldes sind allgegenwärtig. Verschiedene Ansätze verfolgen dabei das Ziel, die Nutzerfreundlichkeit und – gerade im Bereich der Arbeitsassistenzsysteme – auch die Nutzerakzeptanz durch eine strikte Reduzierung notwendiger Interaktionen zwischen Mensch und System zu erhöhen. Dadurch kann der Mensch möglichst unbemerkt und ohne zusätzlichen Aufwand bei seiner Tätigkeiten unterstützt werden. Der Anwender kann sich so stärker als zuvor auf seine Kernaufgabe konzentrieren, wodurch Arbeitsabläufe im industriellen Umfeld effizienter und weniger fehleranfällig gestaltet werden können. Zur Umsetzung dieses Gedankens existieren verschiedene Ansätze, welche sich im Wesentlichen im Grad der Integration in bestehende Arbeitsabläufe und der Mobilität unterscheiden. Im Folgenden werden zunächst die Begriffe Ubiquitous Computing, Ambient Intelligence und Wearable Computing gegeneinander abgegrenzt, um im Anschluss auf den aktuellen Stand der Forschung der für das Forschungsprojekt relevanten Systeme einzugehen.

2.4.1 Begriffsabgrenzung

2.4.1.1 Ubiquitous Computing

In der Allgegenwärtigkeit des Computers (Ubiquitous Computing, UbiComp) spiegelt sich der Ansatz wider, möglichst viele Objekte mit Intelligenz zu versehen und so Produkte und Produktionsmittel mit übergeordneten ERP-Systemen zu vernetzen. Neben verschiedenen Standards zur Datenübertragung finden dabei Datenträger auf Basis von RFID sowie unterschiedliche Sensoren Anwendung. Durch eine mobile Infrastruktur kommunizieren und interagieren die „smarten“ Objekte untereinander und passen sich weitgehend unbemerkt ihrer Umwelt an. Prozessrelevante Informationen lassen sich so in real-time erfassen, wodurch ganze Geschäftsprozesse nachhaltig verbessert werden können ([Chr-03], [Lip-04]). Eine weiterführende, idealistische Sichtweise des Ubiquitous Computing mündet in der Definition des Pervasive Computing. Dabei rückt die Mobilität der Systeme in den Hintergrund, wobei der Ansatz verfolgt wird, den Computer in die Welt des Menschen zu integrieren. Der Rechner wird gezwungen, mit dem Menschen in der realen Welt zu leben, diesen zu unterstützen und dabei möglichst unentdeckt zu bleiben [Wei-91].

2.4.1.2 Ambient Intelligence

In Ergänzung zum Ansatz des Ubiquitous Computing beschäftigt sich Ambient Intelligence (Aml) verstärkt mit der Integration des Menschen in die virtuelle, digitalisierte Welt und verfolgt so das Ziel einer maximalen Akzeptanz des Nutzers. Durch eine optimierte Gestaltung der Schnittstellen zwischen Mensch und Computer stehen dabei die Anforderungen und Bedürfnisse des Menschen im Mittelpunkt. Die smarten Produkte werden auch bei diesem Ansatz möglichst nicht vom Nutzer wahrgenommen und unterstützen diesen bei seiner Tätigkeit durch eine bedarfsgerechte, kontextbezogene Informationsbereitstellung. Wie beim Ubiquitous Computing lässt sich Ambient Intelligence somit als eine humanzentrierte Technikvision beschreiben, welche sich verschiedenster Basistechnologien wie der Virtual und Augmented Reality, Hochfrequenztechnik, Sensorik etc. bedient und den Nutzer in das Zentrum der Kommunikation zwischen Mensch und Technik stellt ([Aar-04], [Did-10]).

2.4.1.3 Wearable Computing

Zur Realisierung der Ansätze aus Ubiquitous Computing, Ambient Intelligence o. ä. finden Wearable Computing Systeme Einsatz, welche sich im Vergleich zum reinen mobilen, tragbaren Computer als integrierte Systeme („Wearables“) auszeichnen. Dadurch wird der Anwender bei seinen Tätigkeiten unterstützt ohne bei der Durchführung seiner Kernaufgabe mit zusätzlichem Aufwand abgelenkt oder in seinen Aufmerksamkeit unnötig gebunden zu werden. Wearable Computing Systemen sollen auf diese Weise eigenständig spezielle Tätigkeiten oder Sequenzen innerhalb definierter (Arbeits-) Abläufe erkennen, um dadurch mit einer bedarfsgerechten Bereitstellung verschiedener, auf den Nutzer abgestimmter Dienste zu reagieren. Nach [Woo-03] können die Systeme auf Basis der PPaFF-Skala (Processor Performance and Function Flexibility) unterschieden werden. Dabei werden neben der Leistung des Prozessors und der Flexibilität der bereitgestellten Funktion unter anderem Faktoren wie der Energieverbrauch oder der Grad an erforderlicher Aufmerksamkeit durch den Anwender berücksichtigt. Beim Einsatz RFID-basierter Arbeitsassistenzsysteme, welche dem Nutzer durch mobile Lesegeräte den Zugang zu digitalisierten Informationen gewährleistet, spielen insbesondere die beiden zuletzt genannten Kriterien eine wesentliche Rolle. ([ScR-10], [Woo-03])

2.4.2 Stand der Forschung

2.4.2.1 Anwendungen RFID-basierter Ubicomp Solutions

Bereits im Jahr 2001 berichtet [Fle-01] in seinen Ausführungen von den Roll-out-Planungen für ein RFID-basiertes Ubicomp-System bei der Herstellung von Wafern. Die Intelligenz der RFID-Transponder auf den Platten soll neben der Positionsbestimmung der Wafer innerhalb des Fertigungsgebäudes genutzt werden, um die Wafer zu autarken Produkten zu entwickeln, die eigenständig Berichte über ihren aktuellen Status abgeben. Die Wafer versenden Warnungen via SMS wenn sie bspw. über einen längeren Zeitraum nicht bewegt wurden oder ihr avisiertes Auslieferungstermin gefährdet ist.

Mit extrem hohen gesetzlichen Anforderungen an Qualität, Sicherheit und Dokumentation von Wartungsaufgaben bietet die Luftfahrtindustrie ein weiteres Anwendungs-

gebiet für Ubicomp-Systeme. Über einen mit RFID-Lesegeräten sowie geeigneten Systemen zur Datenübertragung ausgestatteten Werkzeugwagen werden automatisch Informationen zu den „intelligenten“ Werkzeugen (bspw. über eine anstehende Wartung) an ein zentrales System gesendet. Mithilfe zusätzlicher, mobiler RFID-Lesegeräte können Mitarbeiter zudem sämtliche Daten zu den Werkzeugen abrufen, welche zur korrekten Bedienung bzw. zur Durchführung verschiedener Arbeitsabläufe relevant sind. ([Fle-01], [Lam-05])

2.4.2.2 „Wearable Computing“-Ansätze für mobile RFID-Lesegeräte

Können RFID-Transponder prozessbedingt nicht über stationäre Identifikationspunkte erfasst werden, finden häufig mobile RFID-Lesegeräte auf Basis handelsüblicher Handhelds Verwendung. Parallel zur eigentlichen Haupttätigkeit bedeutet die Handhabung der Geräte bei Anwendungen in Produktion und Logistik jedoch meist einen erhöhten Aufwand. Das verfolgte Ziel liegt daher darin, ein mobiles RFID-Lesegerät nach den Ansätzen des Wearable Computing in die Tätigkeiten des Anwenders zu integrieren, ohne ihn dabei bei seiner Kernaufgabe zu stören.

Seit einigen Jahren gibt es in der Forschung die Bestrebung, das RFID-Lesegerät in Form eines Handschuhs bzw. Armbandes zu etablieren. Aufgrund der meist geringen erforderlichen Lesereichweite sowie der Unempfindlichkeit gegenüber dem hohen Wassergehalt des menschlichen Körpers konzentrierten sich die Forschungstätigkeiten dabei zumeist auf niederfrequente RFID-Systeme. So berichtete [ScA-00] bereits im Jahr 2000 über die Entwicklung eines mobilen RFID-Lesegerätes¹, welches nach den Ansätzen des Wearable Computing in die Kleidung und den Arbeitsablauf der Mitarbeiter integriert werden kann. Das RFID-System im LF-RFID-Bereich (125 kHz) wurde zur Optimierung von Arbeitsprozessen konzipiert, welche ganz allgemein die Handhabung physischer Objekte beinhalten. Der Hauptanteil der benötigten RFID-Hardware wurde in ein 6x10 cm großes Gehäuse verbaut, welches am Körper zu tragen war und durch eine Kabelverbindung mit der Antenne im Handschuh verbunden wurde [ScA-00]. Die Nachteile des Systems waren u. a. eine zweite Kabelverbindung zwischen dem Gehäuse und einem (stationären) Rechner, wel-

¹ Ein mobiles RFID-Lesegerät, welches den Ansätzen des Wearable Computing gerecht wird, wird in der vorliegenden Arbeit auch als RFID-Handschuh bezeichnet.

che den Arbeitsplatz räumlich stark einschränkt, sowie die fehlende Rückmeldung (akustisch, visuell etc.) bei einem erfolgreichen Lesevorgang. Aufbauend auf dieser Arbeit entwickelte die „University of Washington“ in Kooperation mit Intel Research Seattle einen RFID-Handschuh im Frequenzbereich von 13,56 MHz zur Untersuchung von Aktivitäten des täglichen Lebens durch die Identifikation von RFID-Transpondern bei der Berührung gekennzeichnete Objekte ([Phi-04], [Fis-05]). Im Vergleich zu den Ausführungen in [ScA-00] übermittle das RFID-Lesegerät in [Fis-05] die Lesevorgänge kabellos an einen stationären Rechner. Sämtliche Komponenten des Systems mit Ausnahme der Antenne (Batterie, RF-Modul etc.) wurden in ein Gehäuse auf dem Handschuh integriert (vgl. Abbildung 23, links).



Abbildung 23: Gestaltung eines tragbaren RFID-Lesegerätes ([Phi-04], [Lus-07], [IFF-10])

Einen weiteren Anwendungsfall eines derartigen RFID-Lesegeräts beschreibt [Bab-05] bei der Untersuchung eines Tatortes infolge eines Verbrechens. Dabei werden die Tüten zur Aufbewahrung von Beweisstücken mit RFID-Transpondern gekennzeichnet und mit dem jeweiligen Inhalt verknüpft. Über die Integration zusätzlicher Technik wie GPS, einem Mikrophon und einer Kamera können weitere Informationen zum Beweisstück (Koordinaten des Fundortes, Erklärung durch die Eingabe über Sprache oder Bilder) mit dem Transponder verknüpft werden. Wenn die jeweiligen Transponder dann ausgelesen werden, kann direkt auf detaillierte Informationen zum Beweisstück zurückgegriffen werden. In der Anwendung besteht jedoch eine wie in [ScA-00] eine (serielle) Kabelverbindung zu einem Rechner. [Bab-05]

Am MIT Media Lab, Cambridge wurde im Jahr 2005 ein weiteres mobiles RFID-Lesegerät entwickelt, welches in Form eines Armbandes am Handgelenk getragen wird und über eine kabellose Schnittstelle im 2,4 GHz ISM Band mit einer Recheneinheit kommuniziert [Fel-05]. Dabei wurde das RFID-Lesegerät mit Sensorik zur Erkennung bestimmter Bewegungsabläufe des Nutzers kombiniert und eine maxi-

male Miniaturisierung der Gesamtanwendung angestrebt. Trotz drastischer Reduzierung der Größe konnte durch die Verwendung eines HF-RFID-Readers (13,56 MHz), einer Antenne mit dem Durchmesser des Handgelenks und eines HF-Leistungsverstärkers eine Reichweite von ca. 10 cm erreicht werden. [Fel-05]

Im Jahr 2008 berichtete [Sti-08] vom Einsatz eines Wearable Computing System, welches für die Bereiche Produktion und Wartung konzipiert wurde. Im Rahmen des wearIT@work-Projektes [Luk-07] diente ein RFID-Lesegerät in Kombination mit weiteren Sensoren zur Unterstützung von v. a. unerfahrenen Mitarbeitern durch eine kontextbezogene Informationsbereitstellung. Das RFID-Lesegerät zwischen Daumen und Zeigefinger des Mitarbeiters identifiziert dabei verschiedene Objekte (z. B. einen Akkuschrauber) während der Handhabung derselben. Zur Interpretation der identifizierten Transponderdaten werden diese über eine Bluetooth-Schnittstelle an eine Recheneinheit übertragen. [Sti-08]

Die Überwachung des körperlichen Zustandes sowie die Unterstützung der Selbstständigkeit von Menschen mit gesundheitlichen Problemen bspw. bei vermindertem Erinnerungsvermögen oder Blindheit stellen weitere Anwendungen für den Einsatz eines mobilen RFID-Handschuhs im Bereich des Gesundheitswesens dar ([Lus-07], [Lee-10]). Weitere Forschungsaktivitäten im Bereich von mobilen RFID-Lesegeräten im Sinne des Wearable Computing beschäftigten sich mit der Identifikation von Tätigkeiten im täglichen Leben [Pat-05], dem Einsatz in Wartungs- und Instandhaltungsprozessen [Wit-06] oder Anwendungen für Inventurprozesse [Mug-09]. Auch hier bringen niederfrequente RFID-Systeme die besten Voraussetzungen mit, da beim Lesevorgang meist mit direktem Kontakt zwischen Transponder und Antenne des Handschuhs gearbeitet werden kann. Jedoch auch auf dem in Produktion und Logistik weiter verbreiteten UHF-Frequenzband (EU: 868 MHz), welches sich u. a. durch höhere Lesereichweiten auszeichnet, existieren bereits Entwicklungen von RFID-Handschuhen. Diese gehen jedoch wie auch im niederfrequenten Bereich nicht über den prototypischen Aufbau hinaus. Das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) beispielsweise arbeitet insbesondere im logistischen Umfeld an der Integration eines RFID-Handschuhs zur dezentralen Erfassung gekennzeichnete Ware [Kir-10].

2.4.2.3 Anwendungen mobiler Informationsbereitstellung

Beim Einsatz mobiler RFID-Lesegeräte unter „Wearable Computing“-Aspekten bleibt die Darstellung der aus den Transpondern bzw. dahinterliegenden Datenbankstrukturen gewonnenen Informationen offen. Als direkte Schnittstelle zum Menschen ist das Visualisierungsmedium jedoch ein entscheidender Faktor, um den Menschen bedarfsgerecht und ergonomisch mit relevanten Informationen zu versorgen und so eine möglichst hohe Nutzerakzeptanz zu erreichen. Die Bereitstellung prozessrelevanter Informationen dezentral am Ort der Objektidentifikation beruht für Anwendungen in Produktion und Logistik derzeit häufig auf papierbasierten Systemen (Kommissionierliste, Montageanleitungen etc.). Für die Identifikation von Barcodes existieren zudem mobile Handlesegeräte in Form von Laserscannern mit integriertem Display oder mobile Computer mit angeschlossenem Fingerscanner. Einige dieser Handhelds können für den Einsatz von RFID auch um ein HF-Modul erweitert werden, wodurch eine mobile Datenbereitstellung auf Basis von RFID bereits realisiert werden kann. Anwendung im industriellen Umfeld finden solche Systeme in den meisten Fällen für Wartungs- und Inventurprozesse, welche ein mobiles Erfassen von Objekten voraussetzt. Als Beispiel dient hierbei die Wartung von Brandschutzklappen am Frankfurter Flughafen [VDI-10]. Dabei wird der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen langjährigen Nachweispflicht Folge geleistet, welche sich als sehr schwierig realisierbar erwies und durch die manuelle Eingabe und Pflege der Daten ein hohes Fehlerpotenzial barg. Durch den Einsatz von RFID konnten nicht nur administrative Tätigkeiten reduziert, sondern zudem der Nachweis von Wartungsarbeiten optimiert werden. Mit harten Anforderungen an die Robustheit des System aufgrund von rauen Umgebungen setzen auch die Berliner Wasserbetriebe bei der Inventur ihrer Anlagen auf eine mobile Informationsbereitstellung auf Basis RFID-fähiger Handlesegeräte [Sma-10]. Ein RFID-System im 13,56 MHz Frequenzband ersetzt dabei manuelle Prüfvorgänge anhand von Papierlisten sowie die manuelle Eingabe der aktualisierten Daten ins unternehmensinterne ERP-System.

2.4.2.4 Visualisierung von Informationen über HMD

Als Alternative zu papierbasierten Systemen sowie stationären oder handbasierten mobilen Monitoren könnten head-mounted Displays eine kontextbezogene Visuali-

sierung prozessrelevanter Informationen unterstützen. Obgleich ergonomische Unzulänglichkeiten die Nutzerfreundlichkeit dieser Systeme gerade für Anwendungen in Produktion und Logistik einschränken und dadurch einen dauerhaften Einsatz häufig (noch) verhindern, bergen HMD verschiedene Potenziale bei der bedarfsgerechten und nahezu unbemerkten Unterstützung des Menschen. Gerade bei einer hohen Komplexität der Arbeitsaufgabe, einem erhöhten Anteil an Suchtätigkeiten oder ganz allgemein bei Arbeitsabläufen, die den Bedarf an einer informatorischen Unterstützung mitbringen, können durch die Parallelisierung von Informationsaufnahme und Nebentätigkeiten sowie die Verringerung des Suchaufwandes Einspareffekte erzielt werden ([Alt-03], [Tüm-08]). So entfällt bspw. das Mitführen und Handhaben von Papierbelegen, Handhelds etc., wodurch der Nutzer beide Hände zur freien Verfügung hat und sich somit verstärkt auf seine Haupttätigkeit konzentrieren kann.



Abbildung 24: Gestaltung eines HMD²

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Datenbrillen, die als Bestandteil von Arbeitsassistenzsystemen Anwendung finden können, beschäftigen sich mit der Stärkung

² Quellen: Werbematerial der Firmen Liteye Systems, Inc. (links oben); Trivisio Prototyping GmbH (rechts oben); Laster Technologies (links unten) und Microvision, Inc. (rechts unten)

der Akzeptanz beim Endanwender durch eine verbesserte Systemergonomie und Usability mittels einer nutzerzentrierten Systemgestaltung [Tüm-08]. Zudem beschäftigt sich die Forschung aktuell mit Untersuchungen zur potentiellen Leistungssteigerung bzw. Fehlerreduzierung in Kommissioniersystemen, wobei HMD-basierte Systeme mit bereits ausgereiften Technologien wie Pick-by-Voice, Pick-by-Light, Papierliste etc. verglichen werden. Dabei konnten die Potenziale der Datenbrille zur Leistungssteigerung sowie zur Vermeidung von Fehler nachgewiesen werden ([Gün-09], [Ibe-09]). Weitere Einsatzfelder im industriellen Umfeld wie Montage, Wartung oder Qualitätssicherung versprechen ähnliche Potenziale.

3 Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

Bei der Erarbeitung der Einsatzszenarien für das RFID-AR-System gilt es zunächst zu ermitteln, in welchen Unternehmensbereichen und -prozessen sich Möglichkeiten für eine sinnvolle Implementierung des Systems ergeben bzw. in welchen Bereichen Prozessverbesserungen erreicht werden können. In einem zweiten Schritt werden die relevanten Unternehmensbereiche bzw. Prozesse analysiert, um konkrete Einsatzszenarien zu spezifizieren. Im Zuge der Definition der Szenarien erfolgt durch qualitative sowie quantitative Analysen eine Auswahl spezifischer Anwendungen mit den größten Potenzialen. Die ausgewählten Einsatzszenarien werden abschließend auf Anforderungen hinsichtlich der Entwicklung eines Systems zur papierlosen Produktion und Logistik untersucht.

3.1 Einsatzszenarien

Im Rahmen von Experteninterviews sowie einer Sitzung im projektbegleitenden Ausschuss wurden bereits zu Beginn des Forschungsprojektes mögliche Einsatzszenarien für die Kombination der beiden Technologien RFID und Augmented Reality ermittelt. Als Grundlage der Diskussionen dienten jeweils folgende Fragestellungen:

- In welchen Branchen und für welche Produkte können Sie sich eine Anwendung vorstellen³?
- Für welche Prozesse in Ihrem Unternehmen bzw. den Unternehmen Ihrer Kunden können Sie sich eine Verbesserung durch das Zielsystem vorstellen?

³ Es wurde darauf hingewiesen, dass die Transponder-Anbringung im Zielsystem sowohl über Produkte/Artikel als auch über Ladehilfsmittel sowie Ladungsträger erfolgen kann.

3 Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

Die Ergebnisse der Befragungen bezüglich der Branchen, Produkte sowie Unternehmensprozesse mit dem größten Potenzial für den Einsatz des RFID-AR-Systems werden in Abbildung 25 bzw. Abbildung 26 zusammengefasst.

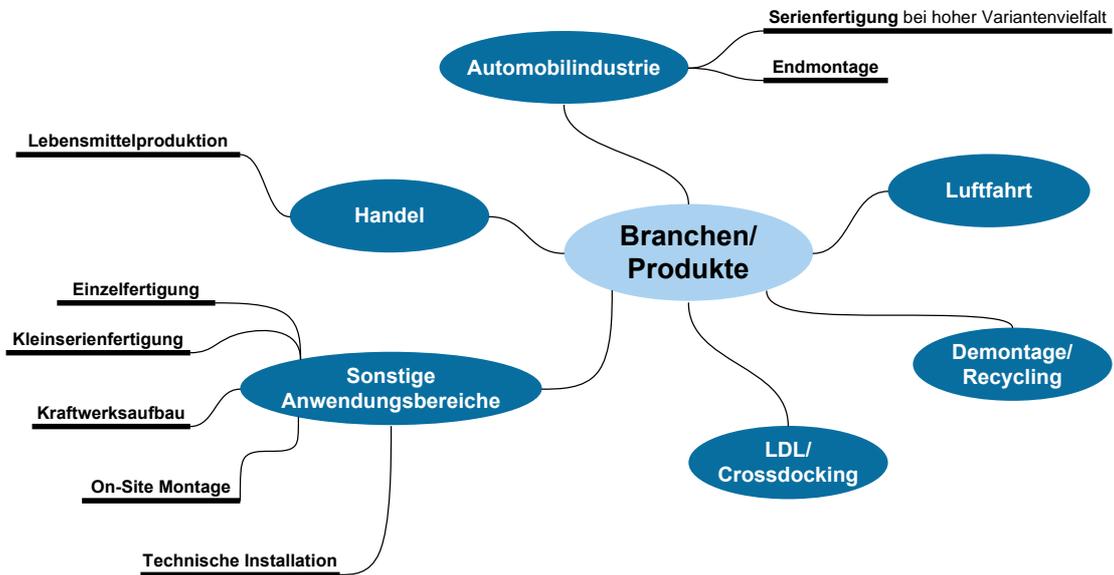


Abbildung 25: Einsatzszenarien des Zielsystems – Branchen und Produkte

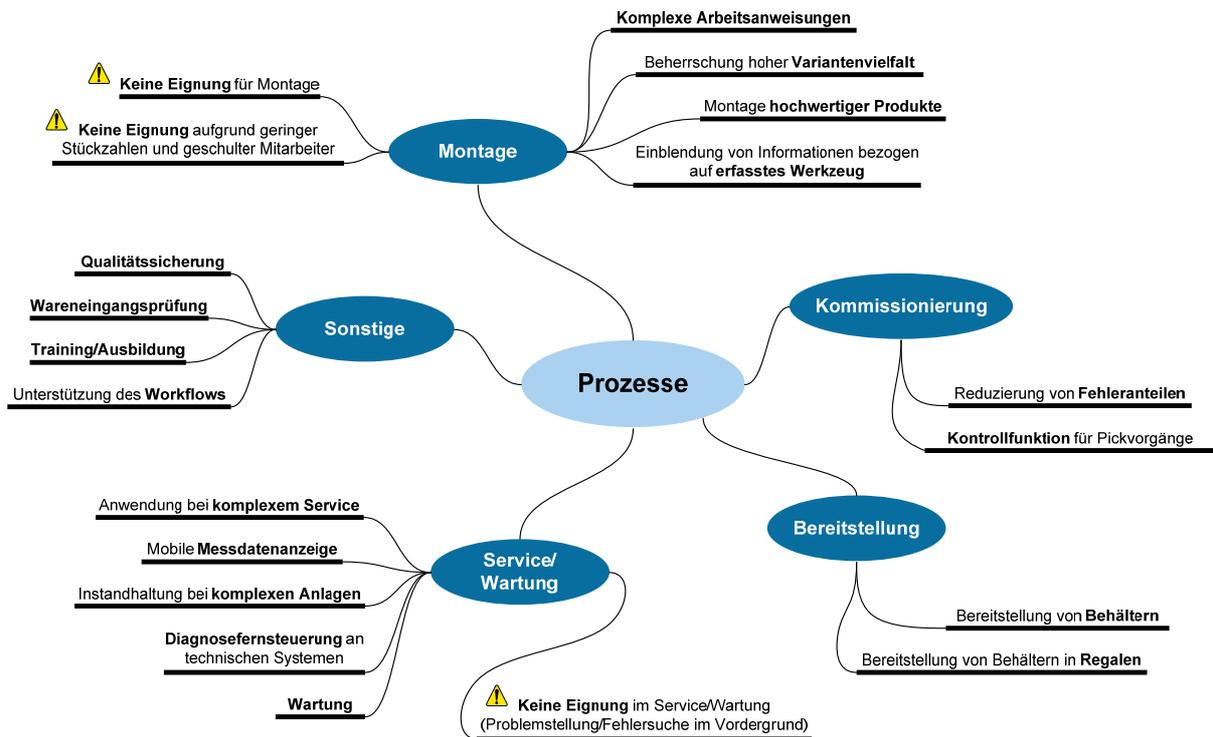


Abbildung 26: Einsatzszenarien des Zielsystems – Prozesse

Bei der Ermittlung potenzieller Unternehmensprozesse fällt auf, dass für die Bereiche Montage sowie Service/ Wartung die meisten Anwendungsfälle identifiziert, jedoch in beiden Fällen auch negative Anmerkungen bzgl. der Eignung für den Einsatz

des Zielsystems geäußert wurden. Für die Anwendung innerhalb der (manuellen) Montage gilt es zu erwähnen, dass die Mitarbeiter ihre Arbeitsabläufe häufig sehr routiniert ausführen und keinerlei Hilfestellung benötigen. Im Bereich der Service- bzw. Wartungsarbeiten steht nicht selten die Fehlersuche im Vordergrund, sodass mit dem Zielsystem lediglich eine geringfügige Optimierung im Gesamtprozess erreicht werden kann. Zudem gilt es bei der Entwicklung des Systems darauf zu achten, eine zu starke Führung und im Besonderen eine zu starke Kontrolle der Mitarbeiter zu vermeiden.

Basierend auf Experteninterviews lassen sich sieben Unternehmensbereiche zusammenfassen, welche im Folgenden näher auf ihr Potenzial untersucht werden: Montage, Kommissionierung/ Bereitstellung, Wartung, Wareneingang, Qualitätssicherung, Demontage/ Recycling, Training/ Ausbildung.

3.1.1 Bewertungskriterien zur Auswahl der Einsatzszenarien

Auf Grundlage der Experteninterviews, des Projektbegleitenden Ausschusses sowie weiterer Recherchetätigkeiten in der entsprechenden Literatur wurden folgende Bewertungs-/ Entscheidungskriterien zusammengefasst:

- Beherrschung hoher Variantenvielfalt (Bsp.: Kontextbezogene, schnelle Aufnahme der relevanten Informationen bei der Bearbeitung seltener Varianten, Instandhaltung/ Wartung komplexer Anlagen, Unterstützung von Demontageaufgaben etc.)
- Reduktion von Fehleranteilen durch die Integration von Kontrollfunktionen (Bsp.: Bearbeitung komplexer Arbeitsabläufe, Entnahme von Artikeln/ Bauteilen, Bereitstellung von Behältern etc.)
- Sicherung von Produktqualität (Bsp.: Kontrolle/ Prüfung von Produktmerkmalen, Montage hochwertiger Produkte, mobile Messdatenanzeige etc.)
- Reduzierung von Basiszeiten (Bsp.: Reduzierung der Zeiten zur Aufnahme und Abgabe von Arbeitsanweisungen etc.)
- Reduzierung von Totzeiten (Bsp.: Wegfall von Medienwechsel zwischen papierbasiertem Arbeitsauftrag und Anzeige über digitalen Bildschirm, Reduzierung der Zeiten zum Suchen von Arbeitsanweisungen etc.)

3 Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

- Erhöhung der Flexibilität (Bsp.: Flexible Bereitstellung von Informationen über kurzfristige Änderungen, flexibler Einsatz ungelernter Mitarbeitern durch eine intuitive Bedienung des Systems etc.)
- Technische Umsetzbarkeit (Bsp.: Notwendigkeit eines Einsatzes von Tracking-systemen, Notwendigkeit eines Eingriffs in bestehende Infrastruktur etc.)
- Arbeitssicherheit/ Ergonomie (Bsp.: Entlastung der Mitarbeiter von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten, Einschränkungen des Sichtfeldes der Mitarbeiter, Einschränkung der Möglichkeiten zur Kommunikation mit Kollegen etc.)
- Training/ Ausbildung von Mitarbeitern

Zur Gewichtung und Priorisierung werden die einzelnen Bewertungskriterien mittels einer Einflussmatrix einander gegenübergestellt (vgl. Anhang B). Die Einflussmatrix dient im Allgemeinen der Ermittlung von Art und Intensität der gegenseitigen Beeinflussung mehrerer Systemelemente. Dadurch können nicht nur die Zusammenhänge der einzelnen Elemente erarbeitet, sondern ebenso Unklarheiten hinsichtlich der wichtigen Systemelemente aufgedeckt werden. Die Einflussmatrix bildet daher die Grundlage für die Festlegung geeigneter Entwicklungsschwerpunkte. [Lin-09]

Bei der Anwendung der Methode werden in einem ersten Schritt die Elemente in einer Matrixform gegenüber gestellt. Jede Verknüpfung zweier Elemente wird dann hinsichtlich des Einflusses eines Elements auf das andere Element bewertet. Dabei gilt, dass das Element in der Zeile das jeweilige Element in der Spalte beeinflusst. Durch die Berechnung von Aktivsumme (Zeilensumme) und Passivsumme (Spaltensumme) eines jeden Elements können dann die Aktivität (Quotient aus Aktiv- zu Passivsumme) sowie die Kritikalität (Produkt aus Aktiv- und Passivsumme) ermittelt werden. Durch die Gegenüberstellung von Aktiv- und Passivsumme in einem Einflussportfolio kann der Einfluss bzw. die Gewichtung der Kriterien grafisch dargestellt werden (vgl. Abbildung 27). [Lin-09]

Bei der Auswertung der Einflussmatrix für die Bewertungskriterien zur Auswahl der Einsatzszenarien im Forschungsprojekt können vier Kriterien mit einer verhältnismäßig hohen Kritikalität K identifiziert werden. Neben der „Beherrschung hoher Variationsvielfalt“ ($K=180$), welche sowohl eine hohe Aktivsumme (15) als auch eine hohe Passivsumme (12) aufweist, fallen die Kriterien „Reduzierung von Fehleranteilen“

(K=108), „technische Umsetzbarkeit“ (K=99) sowie „Sicherung der Produktqualität“ (K=96) auf.

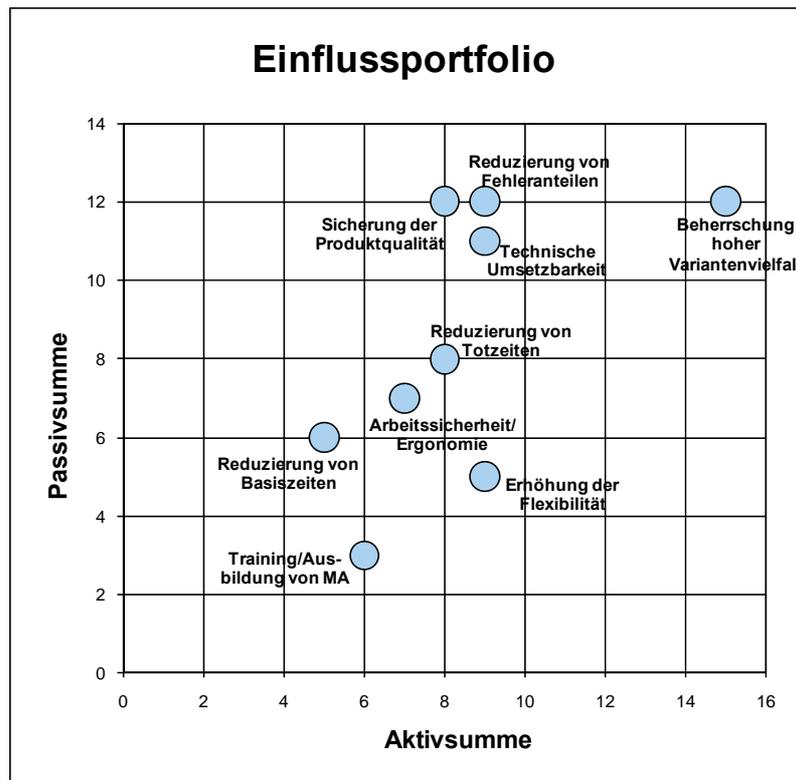


Abbildung 27: Einflussportfolio zur Gewichtung der Bewertungskriterien

Zur Bewertung und Auswahl der Einsatzszenarien werden die Bewertungskriterien hinsichtlich der (relativen) Aktivsumme gewichtet.

3.1.2 Bewertung und Auswahl der Einsatzszenarien

Zur Auswahl der Einsatzszenarien des Zielsystems werden zunächst die verschiedenen Unternehmensbereiche bzw. -prozesse hinsichtlich des Zielerfüllungsgrades der einzelnen Bewertungskriterien untersucht. Die Bewertung wurde in Form einer Nutzwertanalyse durchgeführt. Die Nutzwertanalyse bietet die Möglichkeit einer differenzierten Bewertung und gewährleistet daher die Vergleichbarkeit der Lösungsalternativen [Lin-09]. Das Ergebnis der Methode ist eine – hinsichtlich des Potenzials für einen Einsatz des RFID-AR-Systems – priorisierte Rangfolge der sieben Unternehmensbereiche (vgl. Anhang B und Abbildung 28). Dabei wurde folgendes Bewertungsschema zugrunde gelegt, wobei der Zielerfüllungsgrad jeweils mit einer Skala von minimal 0 bis maximal 3 Punkte bewertet wurde:

3 Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

- Beherrschung hoher Variantenvielfalt:
0: Kein Potenzial zur Beherrschung von Varianten, 3: Maximales Potenzial zur Beherrschung von Varianten
- Reduktion von Fehleranteilen (Kontrollfunktion)
0: Kein Potenzial zur Fehlerreduzierung, 3: Maximales Potenzial...
- Sicherung von Produktqualität
0: Produktqualität kann nicht verbessert werden, 3: Starkes Verbesserungspotenzial...
- Reduzierung von Basiszeiten
0: Keine Einsparung von Basiszeiten, 3: Starke Einsparung...
- Reduzierung von Totzeiten
0: Keine Einsparung von Totzeiten, 3: Starke Einsparung...
- Erhöhung der Flexibilität
0: Keine Steigerung der Flexibilität möglich, 3: Hohes Potenzial zur Steigerung der Flexibilität
- Technische Umsetzbarkeit
0: Schwierig, 3: einfach
- Arbeitssicherheit/ Ergonomie
0: Erhöhte Gefahr/ keine Entlastung des Mitarbeiters, 3: Keine Gefahr/ Entlastung des Mitarbeiters
- Training/ Ausbildung von Mitarbeitern
0: Keine Hilfe durch Trainingsmaßnahmen mit RFID-AR-System, 3: Hohes Potenzial zur Prozessverbesserungen durch Trainingsmaßnahmen

Die Auswertung der Nutzwertanalyse zeigt, dass in der (manuellen) Montage (gewichteter Nutzwert: 22,5 %) das höchste Potenzial für einen Einsatz des Zielsystems zu finden ist. Des Weiteren weisen die Bereiche Kommissionierung/ Bereitstellung (16,7 %), Demontage/ Recycling (16,1 %) sowie Wartung (15,5 %) relativ hohe Nutzwerte auf. Die Bereiche Qualitätssicherung (10,7 %), Training/ Ausbildung (9,5 %) sowie Wareneingang (9,0 %) fallen im Vergleich zu den anderen Lösungsalternativen ab und werden daher nicht weiter verfolgt.

Aufgrund der Ergebnisse der Analyse gliedern sich die Inhalte der im Projekt verfolgten Einsatzszenarien in zwei wesentliche Bereiche. Mit dem höchsten Nutzwert stellt

die (manuelle) Montage einen wesentlichen Teil des Szenarios dar. Zudem wird die Kommissionierung/ Bereitstellung (2. Rang in der Nutzwertanalyse) detaillierter verfolgt. Durch die Fokussierung auf die montagenahe Kommissionierung können die beiden Teilbereiche in einem Gesamtszenario zusammengefasst werden. Um die spezifischen Potenziale der beiden Einsatzszenarien jedoch jeweils einzeln identifizieren und evaluieren zu können, werden für beide Teilbereiche zwei grundsätzlich voneinander getrennte Funktionsmuster entwickelt.

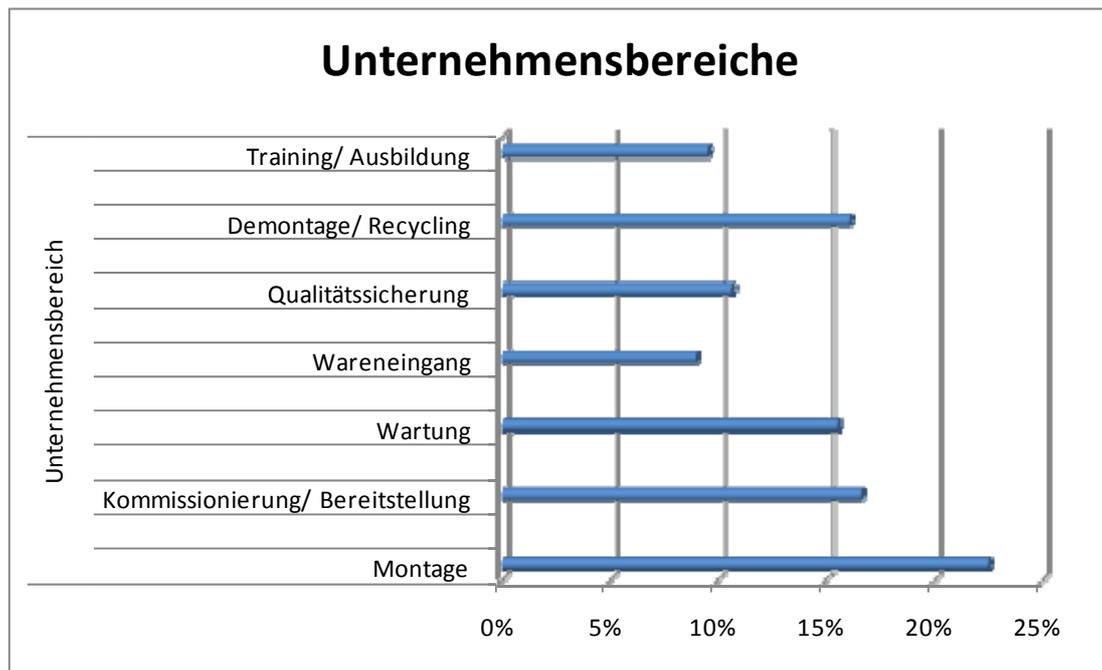


Abbildung 28: Nutzwertanalyse - Auswertung

Aufgrund der ebenfalls hohen Nutzwerte für die Bereiche Demontage/ Recycling und Wartung wird bei der Entwicklung des Systems zur Unterstützung von Montageprozessen mit RFID und AR (vgl. Kapitel 5.3) eine Schnittstelle zu den genannten Bereichen integriert. Das Montageobjekt wird mit einem RFID-Transponder gekennzeichnet, welcher dauerhaft am Objekt verbleiben kann und nach erfolgreicher Montage mit relevanten Daten (z. B. Zeitstempel, verbaute Elemente, verantwortliche Personen etc.) beschrieben wird. Dadurch kann in Wartungs- oder Demontageprozessen auf wichtige Informationen zum Objekt (z. B. Alter des Objektes, verbaute sicherheitskritische Bauteile etc.) zurückgegriffen werden.

3.1.3 Spezifikation der Einsatzszenarien

Um die ausgewählten Unternehmensbereiche im Hinblick auf potenzielle sowie detaillierte Einsatzszenarien des RFID-AR-Zielsystems zu spezifizieren, werden die in Kapitel 2.3 definierten Kriterien zur Abgrenzung der Systeme aufgegriffen. Anhand dieser Kriterien werden im Folgenden die Einflussfaktoren und Realisierungsmöglichkeiten von Montage- bzw. Kommissioniersystemen hinsichtlich der Eignung für den Einsatz des Zielsystems bewertet.

3.1.3.1 (Manuelle) Montage

Innerhalb der (manuellen) Montage gilt es, sämtliche Produkt- und Prozessinformationen in Form eines RFID-Transponders dezentral am Montageobjekt mitzuführen. Je nach Auftragsbearbeitungsstatus kann dann über den RFID-Handschuh sowie den mit dem Montageobjekt verknüpften Transponder direkt am Ort der Montagetätigkeit auf relevante Informationen zurückgegriffen werden. Auszuführende Montageschritte sowie weiterführende Hilfestellungen werden im Anschluss daran über das head-mounted Display visualisiert.

In Anlehnung an die Definition der **Montagestrukturtypen nach [Eve-89]** eignet sich das Zielsystem – bestehend aus RFID und Augmented Reality Komponenten – insbesondere für personalqualifikations- sowie betriebsmittelorganisierte Montagestrukturen. Bei der Personalqualifikationsorientierung können vormontierte Baugruppen unterschiedliche Anforderungen an die Personalqualifikation stellen, welche durch die Integration einer ausführlichen Hilfestellung mittels RFID und HMD ausgeglichen werden können. Mitarbeiter mit weniger Erfahrung bei der Bearbeitung einer spezifischen Baugruppe können dadurch durch das RFID-AR-System unterstützt werden. Werden bei betriebsmittelorientierten Strukturen auch die Werkzeuge o. ä. mit RFID-Transponder versehen, kann über das HMD bspw. auf Eigenheiten bei der Bedienung der Betriebsmittel aufmerksam gemacht werden. Für eine Produkt- bzw. Organisationsformorientierung eignet sich das Zielsystem aufgrund der mit den Montagestrukturtypen verbundenen hohen Stückzahlen und einem daraus resultierenden hohen Grad an Routinetätigkeiten nur bedingt. Die Materialfluss- sowie Produktstrukturorientierung hat im Wesentlichen keinen Einfluss auf die Eignung des Zielsystems.

Für die Einordnung der manuellen Montage hinsichtlich des **Mechanisierungsgrades** gilt, dass das angestrebte Zielsystem grundsätzlich für sämtliche Montageprozesse geeignet ist, in welche der Mensch durch manuelle Tätigkeiten eingreifen muss. Auf Basis dessen bietet die rein manuelle Montage die größten Potenziale. Bei teilmechanisierten Montageprozessen werden Arbeitsvorgänge bspw. durch den Einsatz von Pneumatikschraubern o. ä. mechanisiert, der eigentliche Arbeitsschritt muss jedoch auch in diesem Fall vom Mitarbeiter ausgeführt werden. Dementsprechend kann das Zielsystem auch in diesem Fall zur Optimierung des Gesamtprozesses beitragen. Bei teilautomatisierten/ hochmechanisierten Prozessen weist die Kombination der beiden Technologien RFID und AR lediglich für Spezialfälle Potenziale auf und wird im Forschungsprojekt daher nicht weiter verfolgt. Für durchgängig automatisierte Montageprozesse ohne Eingriff des Menschen findet das Zielsystem keine Anwendung.

Einflussfaktor	Realisierungsmöglichkeit	Einsatz des Zielsystems
Montagestruktur [Eve-89]	Produktorientierung	Geringe Eignung aufgrund hoher Stückzahlen
	Materialflussorientierung	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
	Personalqualifikationsorientierung	Gut geeignet (unterschiedliche Anforderungen an Personenqualifikation)
	Organisationsformorientierung	Geringe Eignung (hohe Stückzahlen)
	Betriebsmittelorientierung	Gut geeignet (teure, ortsgebundene Betriebsmittel)
	Produktstrukturorientierung	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
Mechanisierungsgrad	Rein manueller Montageprozess	Gut geeignet
	Teilmechanisierter Montageprozess	Gut geeignet
	Hochmech./ Teilautom. Montageprozess	Geringe Eignung (Montageprozess weitestgehend automatisiert)
	Automatisierter Montageprozess	Nicht geeignet
Organisationsform [Eve-96]	Baustellenmontage	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
	Gruppenmontage	
	Reihenmontage	
	Taktstraßenmontage	
	Kombinierte Arbeitsplätze	

Tabelle 4: Einordnung des Zielsystems (manuelle Montage)

Die **Organisationsformen** in der manuellen Montage haben keinen Einfluss auf die Eignung des Zielsystems. Aufgrund der Mobilität des RFID-Lesegerätes und Visualisierungsmediums können die erforderlichen Informationen stets dezentral am Ort der Tätigkeit aufgerufen werden. Das System eignet sich daher sowohl für stationäre

als auch für bewegte Montageobjekte. Gleiches gilt für die Unterteilung nach stationären und bewegten Arbeitsplätzen. Für sämtliche Kombinationen kann das RFID-AR-System eine Unterstützung für den jeweiligen Mitarbeiter darstellen.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zur Einordnung und Spezifizierung des Zielsystems für die manuelle Montage zusammen:

3.1.3.2 Montagenahe Kommissionierung

Der Einsatz eines mobilen RFID-Lesegerätes in der Kommissionierung ermöglicht durch die Integration eines Prüfmechanismus, den Mitarbeiter bereits während der Entnahme auf Fehler im Kommissionierprozess hinzuweisen. Durch die Verwendung eines in den Arbeitsablauf integrierten Systems können Fehler vermieden werden, ohne den Werker bei seiner Kernaufgabe zu beeinträchtigen. Das gewohnte Informationsbereitstellungssystem (Pick-by-Voice, Pick-by-Light, Kommissionierbeleg etc.) wird dabei lediglich um den RFID-Handschuh erweitert. Beim Griff in ein Lagerfach wird ohne zusätzlichen Aufwand für den Mitarbeiter ein dem Artikel zugeordneter Transponder erfasst. Dadurch ist es im Falle eines fehlerhaften Griffes möglich, direkt am Ort der Entnahme eine (akustische) Rückmeldung anzustoßen und somit auf den Fehler hinzuweisen. Die Zuordnung der Transponder zu den Artikeln kann dabei entweder über den jeweiligen Behälter, aber auch über den entsprechenden Lagerplatz erfolgen.

Analog zum Einsatzszenario in der manuellen Montage kann auch für den Einsatz in der Kommissionierung eine Einordnung des Zielsystems auf Basis der in Kapitel 2.3.2 dargestellten Eigenschaften erfolgen (vgl. Tabelle 5). Bzgl. des **Informationssystem**s haben in erster Linie die Auftragsaufbereitung, Weitergabe sowie Quittierung Einfluss auf die Eignung des Systems. Für die Auftragsaufbereitung eignen sich Teil- und Einzelaufträge genauso wie Auftragsgruppen. Während bei Teil- und Einzelaufträgen lediglich die Entnahme der Artikel überprüft wird, kann bei Auftragsgruppen auch die Abgabe kontrolliert werden. Transponder am Abgabebehälter erfüllen dabei die gleiche Funktion wie die Datenträger am Entnahmebehälter bzw. dem entsprechenden Lagerplatz. Bei der Weitergabe des Auftrages eignet sich das Zielsystem für sämtliche Kombinationen (ohne/ mit Beleg, Einzelposition/ mehrere Positionen). Die Quittierung erfolgt beim Griff in das entsprechende Lagerfach automatisch je Position.

Bei der Definition des **Materialflusssystem**s haben lediglich die Bereitstellung und Entnahme Auswirkungen auf die Eignung des Zielsystems. Für die statische Bereitstellung der Artikel („Mann-zur-Ware“) weist das RFID-AR-System aufgrund des höheren Fehlerpotenzials deutlich höheres Potenzial auf als bei einer dynamischen Bereitstellung nach dem Prinzip „Ware-zum-Mann“. Selbsterklärend ist die Eignung des Zielsystems bzgl. der Entnahme der Artikel. In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die manuelle Entnahme verfolgt.

Einflussfaktor	Realisierungsmöglichkeit	Einsatz des Zielsystems
Informationssystem	Auftragsfassung	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
	Auftragsaufbereitung	Gut geeignet sowohl für Teil- und Einzelaufträge als auch Auftragsgruppen
	Weitergabe	Gut geeignet sowohl für Weitergabe mit/ ohne Beleg als auch für Einzel- oder mehrere Positionen
	Quittierung	automatische Quittierung je Position
Materialflusssystem	Bereitstellen	statische Bereitstellung
	Fortbewegen	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
	Entnahme	manuelle Entnahme
	Abgabe	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
Organisationssystem	Aufteilen	<i>Kein Einfluss auf Eignung</i>
	Abwickeln	Gut geeignet sowohl für einstufige als auch mehrstufige Ablauforganisation
	Sammeln	Gut geeignet sowohl für nacheinander als auch für gleichzeitiges Sammeln
Informationsbereitstellung	Beleggebunden	<i>Keinen Einfluss auf Eignung</i>
	Beleglos – mobil	
	Beleglos - stationär	
Kommissionierfehlerarten	Typfehler	Gut geeignet
	Mengenfehler	Nicht geeignet (Keine Kennzeichnung der Produkte)
	Auslassungsfehler	Gut geeignet
	Zustandsfehler	Nicht geeignet

Tabelle 5: Einordnung des Zielsystems (montagenahe Kommissionierung)

Während die Aufteilung der Zonen keinen Einfluss auf die Eignung des Systems bzgl. des **Organisationssystem**s ausübt, kann das avisierte Zielsystem für eine ein- oder mehrstufige Ablauforganisation sowie für sequentielles (nacheinander) oder gleichzeitiges Sammeln eingesetzt werden. Die Grundlage für die flexible Gestaltung des Organisationssystems liegt wiederum in der Möglichkeit, sowohl den Entnahmeort als auch den Abgabeort zu verifizieren. Vor allem wenn Artikel für mehrere Aufträge in einem Kommissioniervorgang gesammelt werden und erst im Anschluss zu den einzelnen Aufträgen zugeteilt werden, kann die Fehleranfälligkeit des

Kommissioniersystems durch den Einsatz des RFID-Handschuhs deutlich reduziert werden. Analog dazu weisen Systeme, die eine parallele Bearbeitung mehrerer Teilaufträge vorsehen, erhebliches Potenzial für den Einsatz des Zielsystems auf.

Da der RFID-Handschuh (in der im Forschungsprojekt verwendeten Form) zwar kein Display zur Darstellung der Auftragsdaten vorsieht, die Visualisierung der relevanten Informationen jedoch über das HMD erfolgen kann, hat das Prinzip der **Informationsbereitstellung** keinen Einfluss auf das Zielsystem. Auch wenn im Einsatzszenario der montagenahen Kommissionierung auf den Einsatz des HMD verzichtet wird, hat die Informationsbereitstellung keinen Einfluss. Der RFID-Handschuh kann in diesem Fall mit jedem System (Pickliste, Lieferschein, Pick-by-Voice, Pick-by-Light etc.) kombiniert werden – er fungiert dabei lediglich als „Add-on“ zum bestehenden Kommissioniersystem und dient dabei zur Vermeidung von Fehlern.

Ein entscheidendes Kriterium für das Einsatzpotenzial des Zielsystems stellt die **Art der Kommissionierfehler**⁴ dar, die es mit Hilfe des Systems zu verhindern gilt. Die Vermeidung von Typ- und Auslassungsfehler bietet damit das größte Potenzial. Durch die Integration eines Prüfmechanismus, welche Ist- und Solldaten hinsichtlich des Lagerplatzes vergleicht, sowie einer damit verbundenen akustischen Rückmeldung sollen beide Fehlerarten drastisch reduziert werden. Da lediglich eine Kennzeichnung der Behälter bzw. Lagerplätze verfolgt wird, ist es jedoch nicht möglich, Mengenfehler durch den Einsatz des RFID-Handschuhs zu vermeiden. Der Einsatz von RFID-Transpondern auf Artikel-Ebene wird im Forschungsprojekt nicht verfolgt. Zum einen besteht die Gefahr, dass die passiven Transponder – vor allem in Kombination mit metallischen Objekten – nicht zwingend beim Greifen derselben ohne Zusatzaufwand erkannt werden. Zum anderen verhindern wirtschaftliche Gründe häufig eine RFID-basierte Kennzeichnung auf Artikel-Ebene. Zustandsfehler zeichnen sich durch eine mangelhafte Qualität des Objektes aus und sind dementsprechend nicht durch das Zielsystem beeinflussbar.

Bei der Definition möglicher Einsatzszenarien für das verfolgte Zielsystem kann zudem eine Unterteilung nach der **Lagereinheit** vorgenommen werden. Die vielversprechendsten Einsatzmöglichkeiten bieten dabei Kommissioniersysteme, bei denen aus Lagereinheiten wie Paletten, Gitterboxen oder Behälter kommissioniert wird.

⁴ Einteilung der Fehlerarten: vgl. Kapitel 2.3.2.4.

Dabei ist die Größe der Lagereinheit nicht entscheidend. Das System kann sowohl für Großladungsträger als auch Kleinladungsträger verwendet werden. Bei Unterschreiten einer zu definierenden Mindestgröße ist jedoch damit zu rechnen, dass keine sichere Unterscheidung zweier benachbarten Behälter (mit jeweils einem Transponder) möglich ist. Für größere Behälter sind aufgrund der begrenzten Lese-reichweite des RFID-Handschuhs eventuell mehrere Transponder erforderlich. Erfolgt die Kommissionierung ohne die Verwendung von Behältern kann auf die Kennzeichnung der Lagerplätze ausgewichen werden. Mit wenigen Ausnahmen gilt daher, dass das Zielsystem Potenzial für verschiedenste Lagereinheiten aufweist, sofern der Mensch mit seinen motorischen Fähigkeiten und seiner Flexibilität nicht durch ein automatisiertes System ersetzt werden kann. Die Lagergröße hat dementsprechend die größten Auswirkungen bei der Auslegung des Systems. Aus den genannten Gründen hat der **Lagertyp** im Kommissioniersystem keinen Einfluss auf die Eignung des Zielsystems.

3.2 Anforderungsanalyse

Nach [DIN2519a] definiert sich das Lastenheft als die Zusammenstellung aller Anforderungen (des Auftraggebers hinsichtlich Liefer- und Leistungsumfang). Im Lastenheft sind die Anforderungen aus Anwendersicht einschließlich aller Randbedingungen zu beschreiben. Diese sollten quantifizierbar und prüfbar sein. Grundvoraussetzung für die Erstellung eines Lastenheftes ist eine detaillierte Anforderungsliste. [DIN2519a]

Auf Basis der Definition und Spezifikation der Einsatzszenarien werden die Anforderungen bei der Entwicklung eines Systems zur papierlosen Produktion und Logistik zusammengetragen und in Form eines Lastenheftes dokumentiert. Dabei werden die Anforderungen in mehrere Teilbereiche unterteilt (vgl. Abbildung 29). Im Bereich der allgemeinen und organisatorischen Anforderungen finden sich im Wesentlichen die in der Projektbeantragung verankerten Eckdaten des Forschungsprojektes (z. B. Definition konkreter Einsatzszenarien, Durchführung von Labor- und Praxisversuchen etc.) sowie die Zielstellungen zur Prozessverbesserung (z. B. Reduzierung nicht wertschöpfender Tätigkeiten, Qualitätssteigerung etc.) wieder. Die technischen

3 Einsatzszenarien und Anforderungsanalyse

Anforderungen an das zu entwickelnde System beinhalten in erster Linie Aspekte der Hardwareentwicklung, wohingegen sich die Datenhaltung und Datenweitergabe sowie die Flexibilität hauptsächlich an der zugrundeliegenden Software orientieren. Weitere Teilbereiche umfassen ergonomische Gesichtspunkte, Anforderungen zur Gewährleistung einer möglichst hohen Nutzerakzeptanz sowie die Anforderungen an die Kosten. Das gesamte Lastenheft unter Berücksichtigung von Anforderungen mit den jeweiligen Zielstellungen und zusätzlichen Erläuterungen finden sich Anhang C der vorliegenden Arbeit.

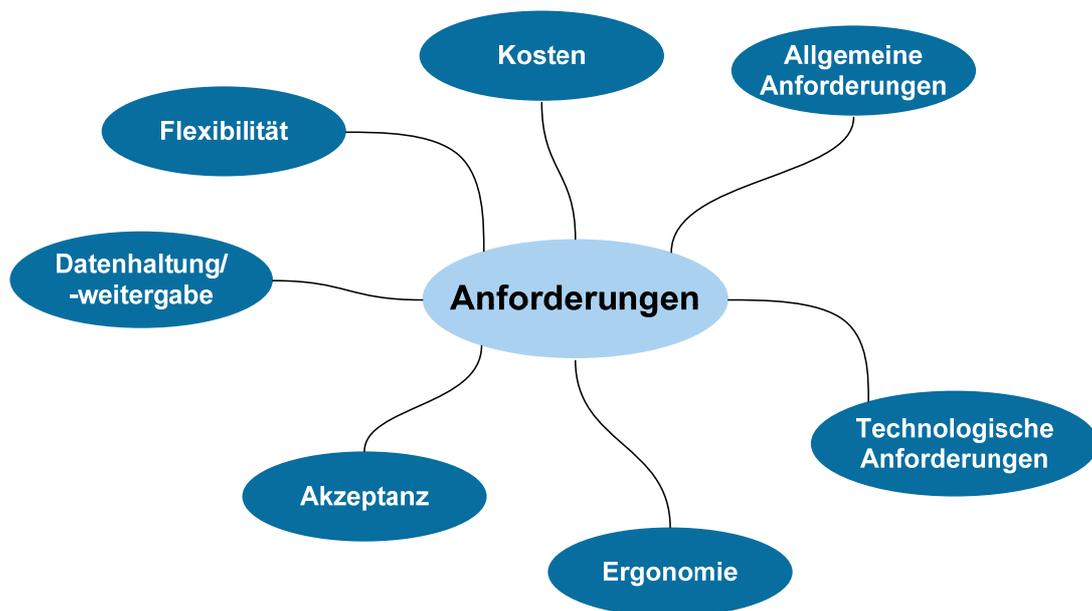


Abbildung 29: Anforderungsanalyse

4 Informationsdarstellung und Interaktion

Mit Hilfe des in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnden Systems werden Mitarbeiter in Produktions- und Logistikprozessen bei der Ausübung ihrer Tätigkeiten durch eine kontextbezogene Informationsbereitstellung unterstützt. Die beiden Hauptkomponenten sind dabei der RFID-Handschuh und das head-mounted Display. Bei der Integration der Komponenten in den Arbeitsablauf gilt es, verschiedene Aspekte der Informationsdarstellung und Interaktion zu berücksichtigen. Die relevanten Informationen müssen schnell zugänglich und eindeutig visualisiert werden, die notwendigen Interaktionen müssen strikt reduziert werden. Dadurch kann nicht nur die Nutzerakzeptanz des Systems gesteigert werden, sondern auch die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter optimiert werden.

4.1 Gestaltungsrichtlinien

Neben arbeitsmedizinischen und ergonomischen Aspekten müssen das Visualisierungs- und Interaktionskonzept eine möglichst unbemerkte Unterstützung des Mitarbeiters durch die technischen Hilfsmittel unterstützen. Im Folgenden wird dazu im Wesentlichen die DIN EN ISO 9241⁵ mit dem Titel „Ergonomie der Mensch-System-Interaktion“ herangezogen, welche ein umfangreiches Hilfswerk bei der Gestaltung einer solchen Schnittstelle darstellt. Hierin finden sich Angaben zu verschiedenen Ausführungen der Mensch-Maschine-Kommunikation. Des Weiteren wird die „Be-

⁵ In der vorliegenden Arbeit werden die Darstellung der Information auf dem head-mounted Display sowie die Ausrichtung des Systems auf das Interaktionsgerät fokussiert. Dabei finden insbesondere die beiden Teile 12 „Informationsdarstellung“ und 110 „Grundsätze der Dialoggestaltung“ der DIN EN ISO 9241 Verwendung.

nutzerorientierte Gestaltung interaktiver Systeme“ in der DIN EN ISO 13407 thematisiert. Diese stellt die Verbindung zwischen der Gestaltung von Systemen und den entsprechenden Nutzeranforderungen her, soll jedoch durch den Teil 210 der DIN EN ISO 9241 abgelöst werden. ([DIN9241], [DIN13407])

4.1.1 Gestaltungsrichtlinien zur Informationsdarstellung

Zur Unterstützung des Nutzers gilt es, durch eine optimierte Informationsdarstellung die Wahrnehmungsaufgabe effektiv, effizient und zur Zufriedenheit des Nutzers zu gestalten. Dabei wird die Information entsprechend den Erwartungen des Nutzers sowie den Anforderungen der Arbeitsaufgabe erwartungskonform platziert. Dadurch sind die relevanten Informationen intuitiv und schnell zugänglich, wodurch Suchzeiten nach notwendigen Informationen verringert werden. Weiterhin werden einzelne Bereiche definiert (z. B.: Identifikationsbereich, Ein-/ Ausgabebereich, Steuerungsbereich) und diese konsistent positioniert. Zudem gilt es, die Informationsdichte, d. h. das Verhältnis zwischen vorhandenen Zeichen und der maximal möglichen Anzahl darstellbarer Zeichen, möglichst gering zu halten. Die Informationsdichte sollte einen Wert von 40 % nicht überschreiten. Grafische Elemente wie Linien oder Rahmen erhöhen den Wert und sind dementsprechend zu vermeiden. Gerade bei der Verwendung eines HMD im angestrebten Zielsystem führt eine hohe Informationsdichte zu einer starken Überdeckung der realen Umgebung. Dies kann sich wiederum negativ auf die Nutzerfreundlichkeit und ergonomischen Anwendbarkeit auswirken. Bei einer zu hohen Informationsdichte kann eine Unterteilung der Arbeitsschritte in einzelne Teilschritte Abhilfe schaffen. Um den Nutzer des Systems zu unterstützen, die relevanten Informationen leichter wahrzunehmen und schneller zu verstehen, können Informationen gruppiert werden. Demnach unterscheiden sich die Informationsgruppen durch Abstände und Lage. Weitere Gruppierungselemente wie Rahmen sind im Umfeld der Augmented Reality bzw. bei Verwendung von HMD aus oben genannten Gründen nur in Ausnahmefällen einzusetzen. Die Gruppierung der Informationspakete erfolgt dabei stets unter Berücksichtigung der Reihenfolge der Arbeitsschritte oder der Funktion.

In der DIN EN ISO 9241-12 werden weitere Elemente wie Listen, Tabellen, Beschriftungen oder Kodierung beschrieben. Diese können bei der Gestaltung des Zielsys-

tems jedoch nur in einer auf besondere Anforderungen angepassten Ausprägung verwendet werden.

Neben den beschriebenen Aspekten gelten für die Informationsdarstellung weitere Grundsätze, welche im folgenden Beispiel veranschaulicht werden.

- Klarheit: Der Informationsinhalt wird schnell und genau vermittelt.
- Unterscheidbarkeit: Die angezeigte Information kann genau unterschieden werden.
- Kompaktheit: Nur die Informationen werden angezeigt, die für das Erledigen der Aufgabe notwendig sind.
- Konsistenz: Gleiche Informationen werden innerhalb der Anwendung entsprechend den Erwartungen des Nutzers stets in gleicher Form dargestellt.
- Erkennbarkeit: Die Aufmerksamkeit des Nutzers wird stets zur relevanten Information gelenkt.
- Lesbarkeit: Die Information ist leicht zu lesen.
- Verständlichkeit: Die Bedeutung ist leicht verständlich, eindeutig interpretierbar und erkennbar.

<i>Auftragsnummer 400782 Benutzer: Maier, K.</i>	
<i>1. Artikel</i>	<i>A</i>
<i>2. Artikel</i>	<i>B</i>
<i>Bezeichnung 1. Artikel:</i>	<i>M6 Schlitzschraube</i>
<i>Bezeichnung 2. Artikel:</i>	<i>Stift</i>
<i>1. Artikel Lagerbereich:</i>	<i>Behälterlager</i>
<i>2. Artikel Lagerbereich:</i>	<i>Behälterlager</i>
<i>Lagerfachnummer 1. Artikel:</i>	<i>3</i>
<i>Lagerfachnummer 2. Artikel:</i>	<i>12</i>

Auftragsnummer 400782 Benutzer: Maier, K.	
1. Artikel	A
2. Artikel	B
Bezeichnung 1. Artikel:	M6 Schlitzschraube
Bezeichnung 2. Artikel:	Stift
1. Artikel Lagerbereich :	Behälterlager
2. Artikel Lagerbereich:	Behälterlager
Lagerfachnummer 1. Artikel:	3
Lagerfachnummer 2. Artikel:	12

Lesbarkeit: Aufgrund der kleinen und mit Serifen behafteten Schrift lässt sich die angezeigte Information schlecht lesen.

Unterscheidbarkeit: Vermischte Informationen (zeitlich getrennt benötigten Artikel/ Aufgaben) werden nach Inhalt

Auftragsnummer 400782 Benutzer: Maier, K.	
1.Artikel	A
Bezeichnung 1. Artikel:	M6 Schlitzschraube
1.Artikel Lagerbereich:	Behälterlager
Lagerfachnummer 1.Artikel:	3
2.Artikel	B
Bezeichnung 2. Artikel:	Stift

Auftragsnummer 400782 Benutzer: Maier, K.	
1.Artikel	A
1. Artikel Bezeichnung:	M6 Schlitzschraube
1.Artikel Lagerbereich:	Behälterlager
1.Artikel Lagerfachnummer:	3
2.Artikel	B
2. Artikel Bezeichnung:	Stift

Auftrag 400782	
1.Artikel	A
1. Artikel Bezeichnung:	M6 Schlitzschraube
1.Artikel Lagerbereich:	Behälterlager
1.Artikel Lagerfachnummer:	3

Auftrag 400782	
1.Artikel	A
1. Artikel Bezeichnung:	M6 Schlitzschraube
1.Artikel Lagerbereich:	Behälterlager
1.Artikel Lagerfachnummer:	3

Behälterlager	Auftrag 400782
Hole Artikel A aus Fach 3	

gruppiert. Die zuerst benötigten Informationen werden sortiert, zusammen gebracht und räumlich von anderen Informationen getrennt.

Konsistenz: Um der Erwartungshaltung des Nutzers gerecht zu werden, werden Informationen der gleichen Art auch konsistent dargestellt.

Kompaktheit: Nur die für den nächsten Arbeitsschritt relevanten Informationen werden angezeigt. Gerade bei HMD muss auf eine geringe Verdeckung des realen Umfeldes geachtet werden.

Erkennbarkeit: Um dem Nutzer schnell deutlich zu machen, welche Information relevant ist, werden die aktuell wichtigen Daten in einer größeren Schrift angezeigt.

Klarheit und Verständlichkeit: Zur Beschleunigung der Informationsvermittlung wird gänzlich auf überflüssige Informationen verzichtet. Eine kurze und prägnante Darstellung verringert die Suchzeit nach den relevanten Informationen.

Neben den bereits beschriebenen Gestaltungsrichtlinien existieren weitere Prinzipien, welche eine Darstellung zusammengehöriger Inhalte unterstützt. Im Folgenden wird eine Auswahl an Gestaltungsgesetzen gegeben:

- **Prinzip der Prägnanz:** Information mit klaren, einfachen Formen darstellen.
→ Zur Unterstützung der Wahrnehmung werden einfache Strukturen und ein symmetrisches Layout verwendet.
- **Prinzip der Nähe:** Inhaltlich Zusammengehöriges zusammen anordnen.
→ Nah beieinander liegende Elemente werden als zusammengehörig wahrgenommen
- **Prinzip der Ähnlichkeit:** Ähnliche Elemente sind zusammengehörig.
→ Elemente mit ähnlicher Struktur werden als zusammengehörig wahrgenommen
- **Prinzip der Geschlossenheit:**
→ Nicht vorhandene Teile einer Figur werden vom Nutzer hinzugefügt, unvollständige Figuren vervollständigt.

Einzelne Gestaltprinzipien können sich sowohl gegenseitig widersprechen, als auch gleichzeitig für Orientierung sorgen. Die Gestaltprinzipien Nähe und Ähnlichkeit wirken gegeneinander. Bei gleichzeitiger Verwendung kann der Nutzer nur schwer einem der beiden folgen. Nahe beieinanderliegende Elemente gehören inhaltlich zusammen, während die Struktur über das Prinzip der Ähnlichkeit deutlich wird.

4.1.2 Gestaltungsrichtlinien zur Interaktion

Die Grundlage für die Definition der Anforderungen hinsichtlich der Bedienung des Zielsystems im Forschungsprojekt stellt Teil 110 „Grundsätze der Dialoggestaltung“ der DIN EN ISO 9241. Die Norm unterstützt bei der Gestaltung eines Dialoges zwischen Nutzer und interaktivem System, um Probleme bei der Anwendung des Systems zu vermeiden. Analog zur Darstellung der Informationen wurden auch hier Grundsätze definiert:

- **Aufgabenangemessenheit:** Die Grundlage für die Funktionalität und den Dialog ist die Arbeitsaufgabe und nicht die eingesetzte Technologie.

- Selbstbeschreibungsfähigkeit: Es ist zu jeder Zeit klar ersichtlich, in welchem Dialog und an welcher Stelle der Arbeitsaufgabe sich der Nutzer befindet, welche Handlungsmöglichkeit er hat und wie diese durchzuführen sind.
- Erwartungskonformität: Der Dialog ist konsistent und entspricht den Merkmalen des Nutzers.
- Fehlertoleranz: Das beabsichtigte Arbeitsergebnis kann trotz erkennbar fehlerhafter Eingaben entweder mit keinem oder mit minimalem Korrekturaufwand durch den Nutzer erreicht werden.
- Individualisierbarkeit: Das Dialogsystem lässt Anpassungen an die Erfordernisse der Arbeitsaufgabe sowie an individuelle Vorlieben und Fähigkeiten des Nutzers zu.
- Lernförderlichkeit: Der Nutzer wird vom Dialog beim Erlernen des Dialogsystems unterstützt und angeleitet.

4.2 Visualisierungs- und Interaktionskonzepte

Auf Basis der beschriebenen Grundsätze zur Informationsdarstellung und Interaktion werden im Folgenden Lösungsvarianten erstellt. Die Beschreibung der Visualisierungskonzepte basiert dabei auf einer ersten Version des Referenzprozesses⁶ zur Entwicklung der Funktionsmuster. Dieser beruht auf der Montage eines Schraubstockes mit den Abschnitten „montagenahe Kommissionierung im Behälterlager“, „Materialbereitstellung durch eine Kleinteilelager am Montagearbeitsplatz“ und der „Montage des Schraubstockes“. Im Folgenden wird zunächst dargelegt, welche Gestaltungselemente den Konzepten gemein sind. Darüber hinaus wird bei der Gestaltung der Konzepte verschiedenen Kriterien unterschiedliche Bedeutung beigemessen. Dies ergibt sich daraus, dass es sich bei den Gestaltungsgrundsätzen um teils konkurrierende Zielsetzungen handelt, welche nicht gleichzeitig in vollständigem Umfang erfüllt werden können.

⁶ Der Referenzprozess wird – in seiner endgültigen Form – in Kapitel 5 näher erläutert.

4.2.1 Allgemeingültige Gestaltungselemente

Informationsdarstellung

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Datenbrille ist ein monokulares Farbdisplay mit einer Auflösung von 800x600. Farbdarstellungen sind im Produktionsumfeld jedoch nicht interessant (vgl. z. B. [Rei-09]) und werden daher nicht weiter berücksichtigt. Bei der Darstellung wird lediglich eine Farbe berücksichtigt. Die Schriftgröße darf zum einen nicht zu klein sein, um eine gute Lesbarkeit gewährleisten zu können, zum anderen darf sie aber auch nicht zu viel von der Umgebung verdecken. Zur Bestimmung der optimalen Schriftgröße werden folgende Formeln herangezogen [DIN9241].

$$\text{Zeichenhöhe } h = \text{virtuelle Objektweite} \times \tan(\text{bevorzugter Sehwinkel})$$

$$\frac{1}{12} \text{ Zeichenhöhe} \leq \text{Strichbreite} \leq \frac{1}{6} \text{ Zeichenhöhe}$$

Für die Berechnung der optimalen Schriftgröße wird eine virtuelle Objektweite von 500 mm angenommen. Der bevorzugte Sehwinkel⁷ liegt bei 20'-22' (vgl. z. B. [Alt-03], [Rei-09]). Damit ergibt sich eine Mindestschrifthöhe von 3 mm und folglich eine Strichbreite zwischen 0,25 mm und 0,5 mm.

Um Hauptinformation von Nebeninformation abzugrenzen, empfiehlt es sich, zwei Schriftgrößen zu verwenden. Dabei wird für die Nebeninformation die Mindestschriftgröße gewählt, während die Schriftgröße für die Hauptinformation größer ist. Nicht nur die Schriftgröße, auch die Schriftart sollte der guten Lesbarkeit dienen. So eignen sich vor allem serifenfreie, nicht geglättete Schriftarten. Einstellungen wie kursiv oder groß sollen vermieden werden. Neben der Schrift ist im Bereich der Lesbarkeit darauf zu achten, dass der Randbereich des Displays von Information frei bleibt, da hier eine Verzerrung des Bildes auftritt [Rei-09].

Damit ergibt sich ein rechteckiger Anzeigebereich, der mit Information gefüllt werden kann. Abbildung 30 stellt das Displayfeld dar, welches sich durch den Rand zum

⁷ Der Sehwinkel für aktuell verfügbare HMD liegt meist bei zwei Bogenminuten, wobei jeder einzelne Bildpunkt sichtbar ist [Oeh-04].

relevanten Anzeigebereich verkleinert. Außerdem zeigt die Abbildung den Unterschied zwischen Haupt- und Nebeninformation.

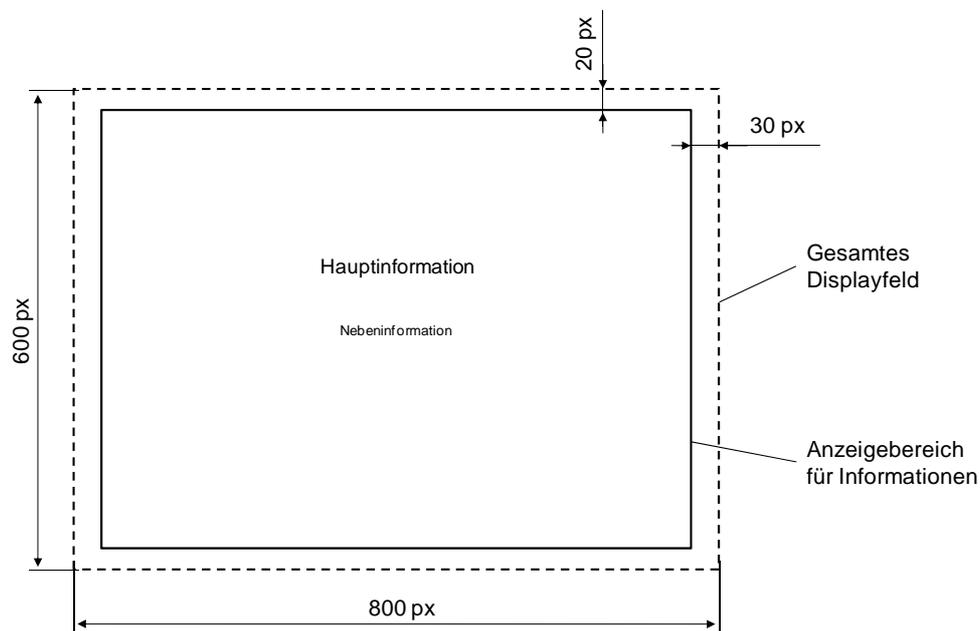


Abbildung 30: Darstellung des Anzeigebereichs am HMD

Generell ist zu beachten, dass die Anzeige nicht mit Zeichen überfüllt ist. Einerseits könnte dies dazu führen, dass der Mitarbeiter Gefahrenquellen übersieht, weil diese verdeckt werden. Andererseits wird der Nutzer durch zu viele Zeichen auf der Anzeige auch überfordert und er benötigt wieder mehr Zeit, um wichtige Information herauszufiltern. Im Sinne der bedarfsgerechten, kontextbezogenen Informationsbereitstellung wird nur die Information angezeigt, die der Nutzer für die jeweilige Arbeitsaufgabe benötigt. Dieser Gedanke wird im Grundsatz Kompaktheit erfasst. Außerdem soll die Information strukturiert dargestellt werden, um im Kontext der Klarheit ein schnelles Erfassen zu ermöglichen. Dies kann über eine Orientierung am virtuellen Gitter erfolgen, durch Gruppierung der Information und räumliche Trennung von inhaltlich verschiedener Information. Die beiden letztgenannten Methoden erfüllen gleichzeitig die Anforderung nach Unterscheidbarkeit. Abbildung 31 zeigt eine Möglichkeit zur Gruppierung verschiedener Informationsarten in mehrere Bereiche des Displays. Im Header Panel finden sich Informationen wieder, die zur Orientierung im Arbeitsablauf bzw. zur Orientierung bei der Auswahl eines Menu-Punktes dienen (hier: Hilfe-Menu in Visualisierungskonzept 3). Im Content Panel, dem zentralen Bereich der Informationsdarstellung, werden sämtliche Daten zur Kommunikati-

on eingeblendet (Arbeitsanweisungen, Warnhinweise etc.). Das Function Panel beinhaltet letztlich Informationen zur Navigation im Arbeitsablauf bzw. zum Aufruf und Navigation eines Programm-Menüs (Hilfe- und Fehlermenu).

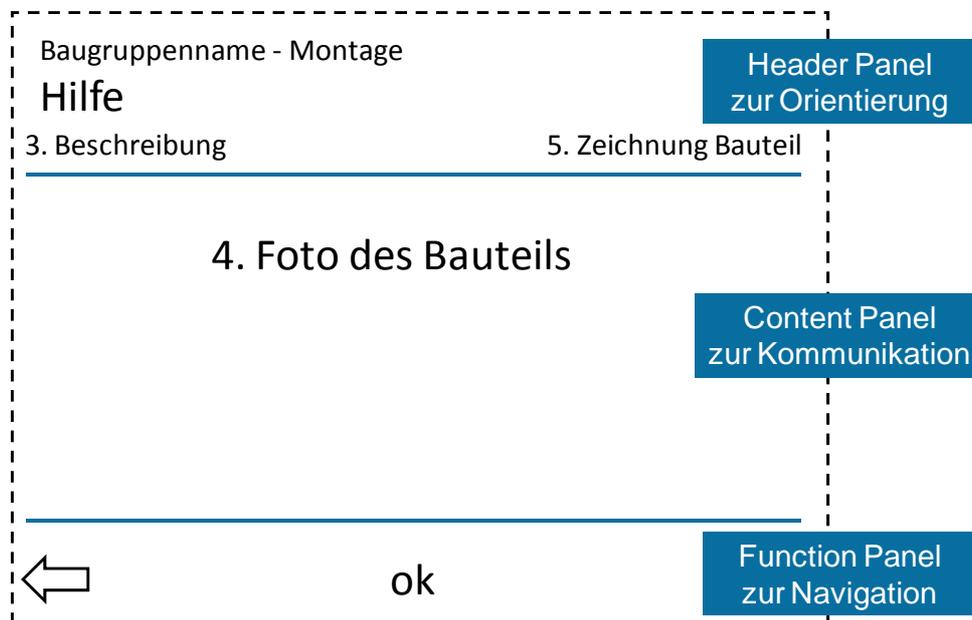


Abbildung 31: Bereichseinteilung für verschiedene Informationsarten

Durch eine kompakte Informationsbereitstellung, gute Lesbarkeit und Strukturierung der Informationen wird gleichfalls der Grundsatz der Klarheit unterstützt. Dem Grundsatz der Konsistenz folgend werden in den Visualisierungskonzepten die Anordnungen der Informationen beibehalten, sodass der Nutzer jeweils gleiche Information an derselben Stelle wieder findet. Wird der Nutzer intuitiv und schnell zu seiner Information gelenkt (Erkennbarkeit) und sind die Informationszeichen für den Nutzer verständlich, werden alle sieben Grundsätze der Informationsdarstellung eingehalten. Die Verständlichkeit der Informationen ist gewährt, wenn sich dem Nutzer der Sinn der Zeichen erschließt. Aufgabenspezifische Abkürzungen wie Lagerfachnummern stellen somit kein Problem dar. Neben alphanumerischen Zeichen hat es sich bei head-mounted Displays bewährt, voll ausgefüllte Grafiken zu vermeiden und stattdessen mit Symbolgrafiken (Rahmen, Kreise, Pfeile etc.) zu arbeiten (vgl. z. B. [Alt-02]).

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Schriftgrößen in allen Visualisierungskonzepten gleich sind, ebenso die Displayeinteilung mit dem erforderlichen Randbereich. In der Informationsdarstellung unterscheiden sich die Konzepte hauptsächlich in der Anordnung und Strukturierung der visualisierten Daten.

Interaktion

Zur Bedienung des Zielsystems stehen dem Nutzer zwei Interaktionsgeräte zur Verfügung. Durch das automatische Erfassen verschiedener Transponder an Produkten, Behältern, Werkzeugen etc. mit dem RFID-Handschuh kann die Softwarearchitektur im Hintergrund auf die jeweilige Tätigkeit des Nutzers reagieren und die Darstellung der entsprechend relevanten Informationen anstoßen. Durch die Integration des RFID-Handschuhs in den Arbeitsablauf entsteht dem Nutzer dadurch keinerlei Mehraufwand. Zur Bewältigung komplexerer Eingaben in das System, welche über eine reine Bestätigung (z. B. Entnahme eines Artikels aus einem Lagerfach) hinausgehen, wurde ein Dreh-/ Drückknopf gewählt, welcher stufenlos in beide Richtungen gedreht und axial gedrückt werden kann. Somit bieten sich dem Nutzer zwei Bewegungsaktionen zur Kommunikation mit dem System.

Bei der Gestaltung der Interaktionen steht erneut die Bedarfsorientierung an erster Stelle. Der Nutzer sollte keine unnötigen Bewegungen außerhalb der wertschöpfenden Tätigkeiten ausführen. Dies äußert sich in den folgenden Konzepten beispielsweise dadurch, dass der Dialog nach erfolgreicher Erfassung eines Transponders durch den RFID-Handschuh ohne eine weitere Aktion vom Nutzer fortgesetzt wird. Der Dialog soll zudem aufgabenangemessen gestaltet werden, sodass die Interaktionen zwischen Nutzer und System auf den im Forschungsprojekt definierten Referenzprozess bzw. die dort gestellten Aufgaben ausgelegt werden. Dadurch wird die Steuerbarkeit der Dialoge bewusst eingeschränkt. Die zur Verfügung stehenden Menüs für Hilfe und Fehler bieten Zusatzinformationen und Abbruchmöglichkeiten. Damit können sowohl Selbstbeschreibungsfähigkeit als auch Fehlertoleranz in den Konzepten verankert werden. Letztere wird zudem durch die Anzeige und Bestätigung von wichtigen Vorgängen (bspw. eines Abbruches) gestärkt.

Mit der Anpassung der Konzepte an die Arbeitsaufgabe und -umgebung sowie der Konsistenz in Darstellung und Interaktion wird eine Erwartungskonformität angestrebt. Weitere Dialoggestaltungsgrundsätze wie Individualisierbarkeit und Lernförderlichkeit wurden in ihrer Bedeutung für die Konzeption am Referenzprozess zurück gestellt. Durch das Anlegen nutzerorientierter Profile kann jedoch jeder Mitarbeiter das System an seine Bedürfnisse anpassen (z. B. Grad der Erfahrung im Arbeitsprozess und entsprechender Detaillierungsgrad der Informationen).

4.2.2 Konzept „ARVIKA“

Im Rahmen des BMBF-geförderten Leitprojekts ARVIKA wurde bereits zwischen 1999 und 2004 im Bereich der AR-Technologie an der Unterstützung von Arbeitsprozessen in Entwicklung, Produktion und Service geforscht. Zu den Themenschwerpunkten zählten dabei Projektstruktur, Basistechnologien sowie eine Benutzerzentrierte Systemgestaltung. Das Ziel des Teilprojekts „Benutzerzentrierte Systemgestaltung“ war die Entwicklung einer universellen Bedienoberfläche für AR-Systeme, wobei der Gestaltungsprozess auf der Norm DIN EN ISO 13407 basierte. Ein Ergebnis des Teilprojektes war ein Style Guide für Augmented Reality Systeme, welcher ein generisches UserInterface-Konzept für verschiedene AR-Anwendungen hervorbrachte und dementsprechend auch auf optische See-Through HMD anwendbar ist (vgl. [ARV-10a], [ARV-10b]).

Das erste Visualisierungs- und Interaktionskonzept im Forschungsprojekt basiert auf den Empfehlungen des Style Guides für ein mobiles System mit optischem See-Through HMD. Das Grundlayout und die Gestaltung der Interaktion sind den ARVIKA Darstellungen angelehnt, die Inhalte der Darstellung wurden jedoch auf den im Forschungsprojekt „Papierlose Produktion und Logistik“ definierten Referenzprozess (siehe auch Kapitel 5) angepasst. Das Basislayout (vgl. Abbildung 32, links oben) lässt sich grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilen, das Content Panel (Inhaltsbereich) sowie das Function Panel (Funktionsleiste) mit integriertem Header Panel (Kopfzeile). Das Header Panel dient lediglich der Orientierung und zeigt eine Überschrift zum aktuellen Inhalt an (Startmenü, Auftrag starten, Fehlerliste abrufen etc.). Im Gegensatz zum textuellem Eintrag im Header Panel werden im Function Panel bis zu fünf verschiedene Funktionen als Icons angeboten. Der „Home Button“ ganz links im Function Panel führt stets zur Startseite, von welcher der Weg durch das System gewählt werden kann. Der Pfeil rechts daneben deutet darauf hin, zur letzten Anzeige zurückzukehren. Im Weiteren symbolisieren die Lupe eine Suchfunktion, der Notizblock eine Notizfunktion und das Fragezeichen ein Hilfemenü. Im Content Panel werden letztlich die jeweiligen Inhalte, wie bspw. Menüs, Anweisungen, Dokumente, Grafiken oder Workflows dargestellt. In diesem Bereich gestaltet sich der Fokus in Form eines Rahmens um den aktuellen Listen- oder Menüeintrag ebenfalls in Anlehnung an die Richtlinien des Style Guides. Mit dem in der vorliegenden Arbeit

4 Informationsdarstellung und Interaktion

verwendeten Dreh-/ Drückknopf kann der Nutzer durch das System navigieren. Eine Bewegung des Knopfes nach rechts steuert den Fokus zum nächsten Eintrag. Ist der Fokus am letzten Eintrag der Liste angelangt, führt ein weiterer Dreh nach rechts in das Function Panel, zum ersten Icon von rechts. Mit weiteren Drehungen des Knopfes wandert der Fokus nach links durch das Function Panel bis dieser wieder beim ersten Eintrag des Content Panels angelangt ist. Durch Drücken des Knopfes wird der aktuell fokussierte Eintrag ausgewählt und auf dem Display erscheint der ausgewählte Eintrag.

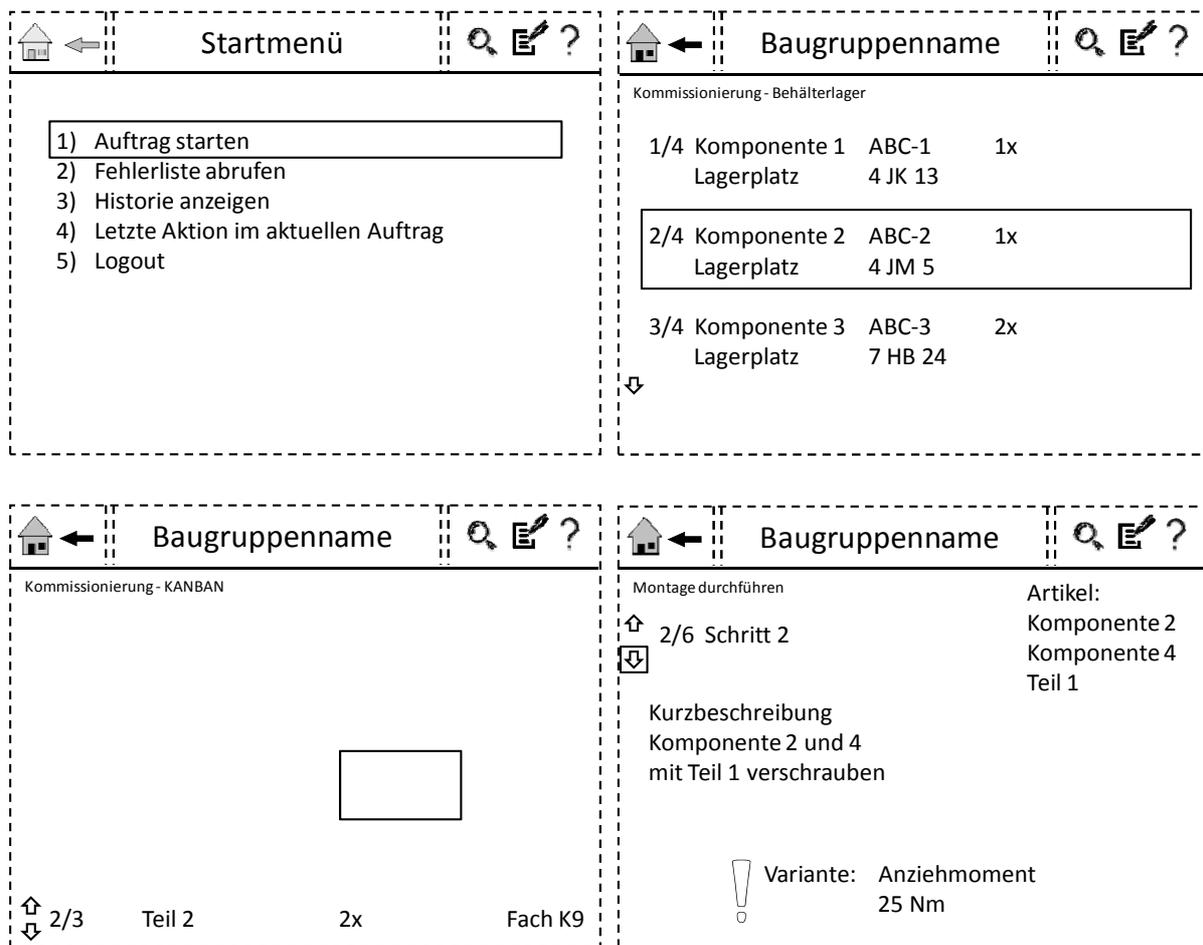


Abbildung 32: Konzept „ARVIKA“ – Screenshots

Wurde das Menü „Auftrag starten“ ausgewählt und nach entsprechender Aufforderung im Content Panel ein Transponder auf einem Kommissionier-Behälter zur Aktivierung eines Auftrages erfasst, gelangt der Nutzer zur Kommissionierung der für die Montage erforderlichen Komponenten (montagenahe Kommissionierung; vgl. Abbil-

ung 32, rechts oben)⁸. Im Header Panel wechselt dementsprechend die Anzeige von „Startmenü“ auf den jeweiligen Baugruppennamen. Unterhalb des Header bzw. Function Panels wird ein Hierarchiepfad angezeigt, welcher der Orientierung im Workflow dient. Während der Entnahme der einzelnen Komponenten aus dem Behälterlager wird ein dem Lagerplatz zugeordneter Transponder durch den RFID-Handschuh erfasst. Dadurch wird zum einen die Entnahme der Komponente im System bestätigt und zum anderen der folgende Arbeitsschritt angestoßen, sodass der Fokus ohne zusätzliche Tätigkeit des Nutzers zur nächsten Komponente wechselt.

Im Allgemeinen werden die Möglichkeiten des Nutzers im vorgestellten Konzept jeweils in einer Liste dargestellt, die über das ganze Display angezeigt wird. Ist die Liste länger als auf einer Darstellung angezeigt werden kann, so wird dies durch Pfeile an der Liste symbolisiert und die Liste scrollt zeilenweise weiter. Diese Art der Interaktion ist darauf ausgerichtet, dass sich der Nutzer lediglich auf den Bildschirm konzentriert. Durch den Überblick der Möglichkeiten kann dieser so schnell erfassen, welche Informationen ihm im jeweiligen Abschnitt zur Verfügung stehen. Die für den aktuellen Arbeitsschritt irrelevanten Informationen verdecken jedoch unnötig stark die Sicht auf die reale Umgebung. Bei der Gestaltung der Listeneinträge wurden die Gestaltungsprinzipien Nähe und Ähnlichkeit beachtet. Zusammengehörige Informationen werden durch die Nähe miteinander verbunden, gleiche Informationsarten werden durch Ähnlichkeit dargestellt.

Ist die montagenahe Kommissionierung im Behälterlager für einen Auftrag komplett abgeschlossen, wird der Nutzer aufgefordert, die erfolgreiche Kommissionierung auf den Transponder am entsprechenden Behälter zu schreiben. Im Anschluss daran wird der Behälter mit der vorkommissionierten Ware zur Montage gefördert. Dort wird erneut im Startmenü ein Auftrag initiiert, der Transponder am Behälter ausgelesen und somit die Montageanweisungen ausgelöst. Ein Montageschritt beginnt dabei meist mit der Entnahme von Kleinteilen im KANBAN-Regal am Montagearbeitsplatz. Dieser wird durch eine dynamische Visualisierung eines Rahmens über dem jeweiligen Lagerfach unterstützt (vgl. Abbildung 32, links unten). Die Listendarstellung mehrerer Teilaufträge gleichzeitig weicht nun dem Rahmen zur dynamischen Unterstützung der Lagerfachsuche. Es werden nunmehr lediglich die für den aktuel-

⁸ Vgl. Kapitel 5.2.4 für eine detailliertere Beschreibung des Workflows im Referenzprozess

len Arbeitsschritt relevanten Informationen eingeblendet. Die Interaktion zur Bestätigung der Entnahme über den RFID erfolgt analog zur montagenahen Vorkommissionierung. Nach abgeschlossener Kleinteilekommissionierung kann der Mitarbeiter nun zum ersten Montageschritt übergehen.

Im Content Panel (vgl. Abbildung 32, rechts unten) wird am linken oberen Bildrand der aktuelle Montageschritt inklusive Listenposition angezeigt. Darunter folgt eine Kurzbeschreibung des Montageschrittes. Am rechten Bildrand wird die Stückliste zum aktuellen Arbeitsschritt aufgelistet. Zudem kann optional durch eine zusätzliche Visualisierung in blickender Form auf eine Besonderheit im Prozess hingewiesen werden. Durch Drehen des Dreh-/ Drückknopfes kann der Nutzer nach Abschluss des Montageschrittes den Fokus auf den Pfeil nach unten setzen, welcher zum nächsten Arbeitsschritt führt. Befindet sich der Fokus wie in Abbildung 32 bereits auf dem Pfeil nach unten, kann der Nutzer entweder den Arbeitsschritt direkt durch Drücken bestätigen oder durch weiteres Drehen den Fokus auf das Hilfemenü im Function Panel navigieren.

4.2.3 Konzept „Kreisnavigation“

Das zweite Konzept zur Visualisierung und Interaktion im Referenzprozess orientiert sich in erster Linie am ausgewählten Interaktionsgerät. Der runde Dreh-/ Drückknopf spiegelt sich in einer Kreisnavigation der Menüführung wieder (vgl. Abbildung 33, links oben). Die Listenelemente des Startmenüs sind kreisförmig angeordnet. Durch Drehen des Knopfes kann so intuitiv zwischen den verschiedenen Elementen gewählt werden. Die Pfeile weisen zudem auf die Reihenfolge der Elemente hin, die jedoch auch mit dem Uhrzeigersinn durchlaufen werden kann. Der aktuelle Fokus wird durch einen Rahmen um das jeweilige Element gekennzeichnet. Durch Drücken des Knopfes wird das aktuelle Element gewählt.

Analog zum Konzept „ARVIKA“ beinhaltet auch das Konzept „Kreisnavigation“ eine Kopfzeile, in hier jedoch lediglich der Orientierung dient und dem Nutzer anzeigt, an welcher Stelle des Workflow dieser sich gerade befindet (vgl. Abbildung 33, rechts oben). Auf der linken Seite des Displays wird die Position im Auftrag angezeigt, rechts die Bezeichnung des aktuellen Auftrags. Letztere wird als Nebeninformation betrachtet und daher in der kleineren Schrift dargestellt. Die bedeutsamere Orientie-

rungsinformation wird oben links platziert. Dies geht auf die gängige abendländische Konvention zurück, wonach Informationen stets von oben und von links beginnend gelesen werden. Mittig im Sichtfeld wird lediglich die Information angezeigt, die aktuell zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe relevant ist. Für die Kommissionierung sind dabei Artikelname, Artikelnummer sowie die zu entnehmende Menge ausreichend. Auf die Informationen zu vor- bzw. nachgelagerten Schritten wird gänzlich verzichtet, wodurch sich der Nutzer verstärkt auf die wesentliche Arbeit konzentrieren kann und beim Einsatz eines HMD die Überdeckung der Realität verringert wird. Die Entnahme des Artikel oder der Baugruppe wird durch den RFID-Handschuh bestätigt, worauf zudem die Visualisierung der Informationen zum nächsten Arbeitsschritt angestoßen wird. Die Darstellung der Informationen folgt hier keinem Gestaltungsprinzip. Die einzelnen Informationen sind hinsichtlich ihrer Bedeutung zwar sortiert, dennoch lässt sich keine Zusammengehörigkeit zwischen einzelnen Daten ablesen.

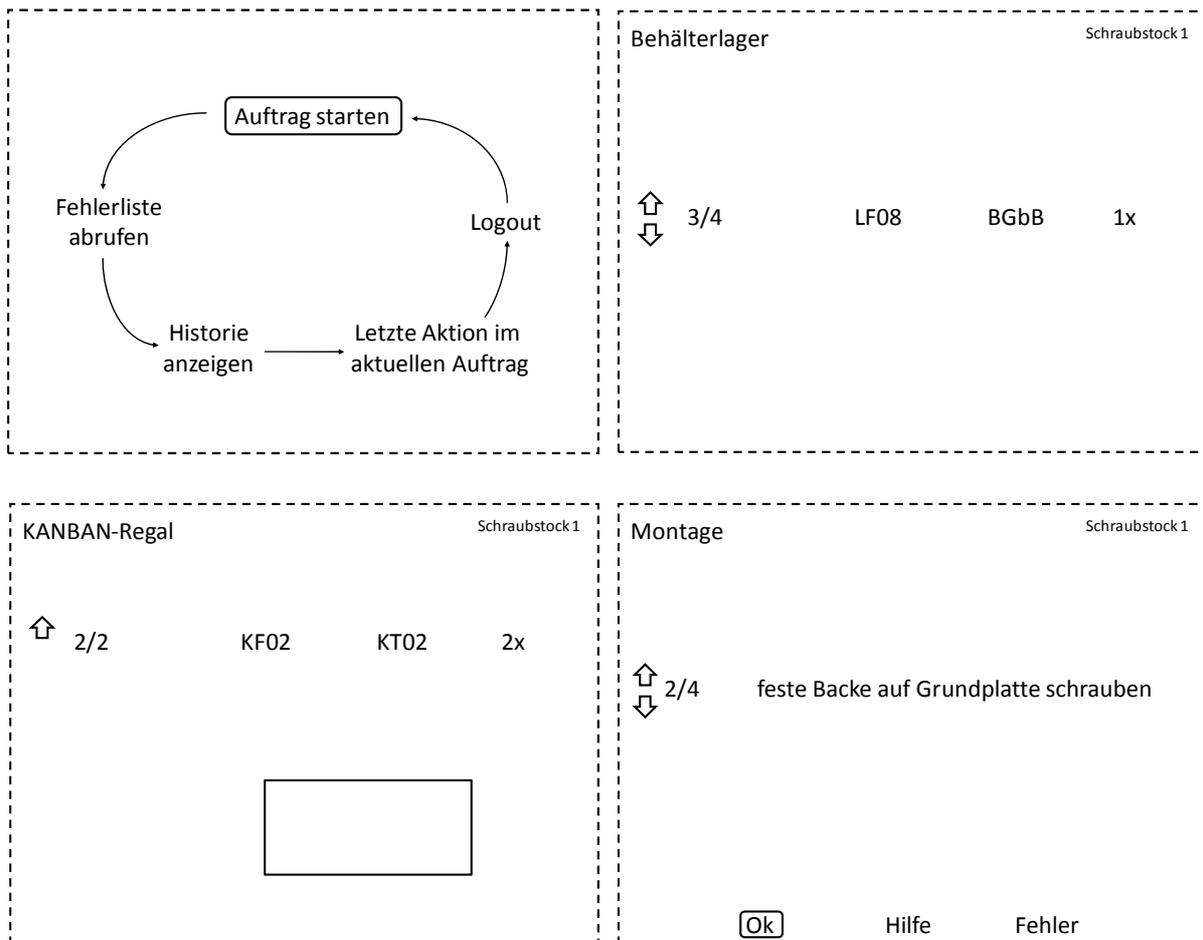


Abbildung 33: Konzept „Kreisnavigation“ – Screenshots

Auf die montagenahe Kommissionierung folgt die Montage mit integrierter Kleinteilebereitstellung. Die Information zum aktuellen Auftragsstatus (montagenahe Kommissionierung oder Montage) wird für alle Konzepte auf den „Master“-Transponder am Behälter des jeweiligen Auftrages gehalten. Der Mitarbeiter in der Montage kann dementsprechend den Auftrag mit Hilfe seines RFID-Handschuhs und dem Transponder am Behälter anstoßen, woraufhin die relevanten Informationen kontextbezogen eingeblendet werden. Die Montageaufgabe eines jeden Montageschrittes gliedert sich wiederum sequentiell in die Kleinteilebereitstellung durch ein KANBAN-Regal (vgl. Abbildung 33, links unten) sowie die eigentliche Montage (vgl. Abbildung 33, rechts unten). Auch diese Aufteilung gilt durchgängig für alle Konzeptvarianten.

Bei der Kleinteilebereitstellung im KANBAN-Regal, welche durch eine dynamische Visualisierung mit dem Trackingsystem gekennzeichnet ist, ergeben sich kaum Änderungen zum Konzept „ARVIKA“. Es wird lediglich auf die Möglichkeiten im Function Panel (Hilfemenü, Notizfunktion, Suchfunktion etc.) verzichtet. Hier besteht für die „einfache“ Tätigkeit der Kommissionierung kaum Bedarf. Wurden alle für den aktuellen Montageschritt benötigten Komponenten kommissioniert, erfolgt die Anzeige der Montageschrittanweisung. Auch hier werden die Informationen strikt auf die aktuell relevanten Daten reduziert. Im Bereich der Montage (Abbildung 33, rechts unten) wird die Struktur der Informationsbereitstellung im Konzept „Kreisnavigation“ deutlich. Das Display wird in die drei Bereiche Orientierung (Header Panel, oben), Inhalt (Content Panel, mittig) sowie Navigation (Function Panel, unten) unterteilt. Header und Content Panel dienen lediglich der Informationsübermittlung, die Interaktion mit dem System erfolgt im Wesentlichen über das Function Panel. Der Nutzer hat die Wahl zwischen den drei Funktionen „OK“, „Hilfe“ und „Fehler“. Kann der Montageschritt ohne Probleme ausgeführt werden, bestätigt der Nutzer nach Abschluss des Montageschrittes diesen mit „OK“. Auf dem „OK“-Button liegt zudem standardmäßig der Fokus, da damit zu rechnen ist, dass in der Regel nicht auf zusätzliche Hilfe oder Fehler zurückgegriffen werden muss. Benötigt der Anwender jedoch Zusatzinformationen zum aktuellen Arbeitsschritt, können diese durch den Button „Hilfe“ aufgerufen werden. Im Hilfemenü stehen bspw. eine Explosionszeichnung des Montageschrittes oder Einzelbilder der jeweiligen Komponenten zur Verfügung. Am Ende der Liste der Hilfemenü-Einträge wird dem Nutzer die Möglichkeit geboten, in die

Ebene der Montageanweisung zurück zu gelangen. Analog dazu ist die Funktionalität des Fehlermenüs aufgebaut. Wählt der Mitarbeiter einen Fehler aus, so kann er die Montage an der Stelle abbrechen. Zudem kann manuell zwischen den Arbeitsschritten gewechselt werden. Diese Funktion wird mittig im Bereich des Content Panels integriert. Die Navigation zu den zuständigen Pfeilen am linken Displayrand erfolgt über den Dreh-/ Drückknopf.

4.2.4 Konzept „Imaginäres Band“

Der Grundgedanke im dritten Visualisierungs- und Interaktionskonzept ist ein imaginäres Band, welches durch Drehen bewegt wird und somit den aktuellen Listeneintrag anzeigt. Die Orientierung am Dreh-/ Drückknopf wird beibehalten. Wie im Konzept „Kreisnavigation“ lässt sich auch hier die Anzeige in die drei Bereiche Orientierung (Header Panel), Inhalt (Content Panel) und Navigation (Function Panel) untergliedern. Abbildung 34 (links oben) zeigt das Startmenü in diesem Konzept. Bereits hier wird ersichtlich, dass neben der Information „Startmenü“ auch die der aktuell fokussierten Funktion vor- und nachgelagerten Menüeinträge im Orientierungsbereich (Header Panel) am oberen Rand des Displays visualisiert werden. Die Möglichkeiten zur Auswahl verschiedener Listenelemente mit dem Dreh-/ Drückknopf wird dem Nutzer am unteren Rand des Displays (Function Panel) durch die beiden Pfeile symbolisiert. Im Function Panel werden stets nur die Aktionen symbolisch dargestellt, die für den aktuellen Arbeitsschritt möglich sind, wodurch der Nutzer zusätzlich in der Interaktion mit dem System unterstützt wird.

In den Abschnitten der Teilebereitstellung aus dem Behälterlager (vgl. Abbildung 34, rechts oben) sowie aus dem KANBAN-Regal (vgl. Abbildung 34, links unten) werden am linken oberen Bildrand zur Orientierung die Bezeichnung des aktuellen Auftrags als Nebeninformation und die Position im aktuellen Auftrag als Hauptinformation angezeigt. Mittig befinden sich wie bei den vorangegangenen Konzepten die aktuell benötigten Informationen (Lagerfach, Artikelnummer und die entsprechende Menge) in statischer bzw. dynamischer Visualisierung. Im Gegensatz zum Konzept „Kreisnavigation“ wird hier das Gestaltungsprinzip der Nähe verwendet. Zwar werden auch in diesem Konzept nur Informationen zum aktuellen Bauteil bereitgestellt, die Zuordnung der zu entnehmenden Menge erfolgt jedoch direkt am Bauteil. Im Funktionsbe-

reich werden sowohl die beiden Interaktionsmöglichkeiten „vor“ und „zurück“, als auch die Position in der Liste angezeigt. Die Bestätigung einer erfolgreichen Entnahme eines Artikels erfolgt wie bei den Konzepten zuvor automatisch durch den RFID-Handschuh. Zur besseren Steuerbarkeit wird in diesem Konzept jedoch das Wechseln zu vor- und nachgelagerten Arbeitsschritten der Kommissionierung ermöglicht. Da jedoch die Übersicht, welche Artikel bereits geholt wurden, nicht verloren gehen darf, müssen bereits erledigte Arbeitsschritte von noch ausstehenden unterschieden werden können. Ein weiterer Unterschied zum vorangegangenen Konzept stellt die Zusammenfassung sämtlicher Möglichkeiten zur (zusätzlichen) Interaktion im unteren Bereich des Displays dar.

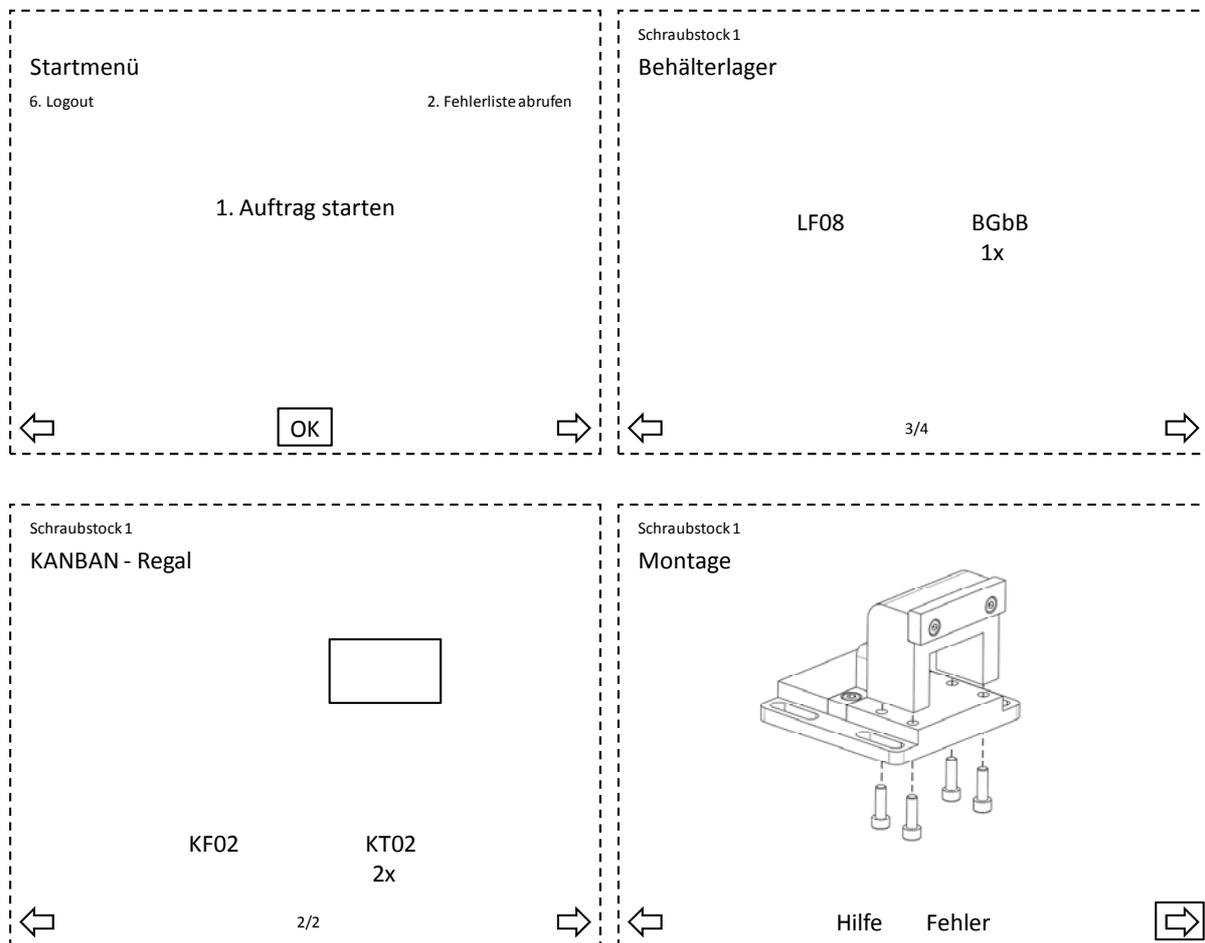


Abbildung 34: Konzept „Imaginäres Band“ – Screenshots

Die Visualisierung eines Montagearbeitsschrittes wird in Abbildung 34 (rechts unten) veranschaulicht. Im Vergleich zur textuellen Beschreibung des Arbeitsschrittes in den ersten beiden Konzepten wird hier direkt die der Montage zugrunde liegende Explosionszeichnung angezeigt. Dabei wird zwei Aspekten Rechnung getragen.

Zum einen kann die für die Ausführung der Tätigkeit wesentliche Information schneller aufgenommen werden und zum anderen besteht Abhängigkeit von der Sprachkenntnis der Mitarbeiter. Auch das Prinzip der Interaktion unterscheidet sich von der „Konkurrenz-Konzepten“. Wie bereits bei den Arbeitsschritten in der Kommissionierung werden auch bei der Montage sämtliche Möglichkeiten zur Interaktion am unteren Rand des Displays angezeigt. Das aktuell fokussierte Element wird dabei mit einem Rahmen hervorgehoben. Die Interaktion erfolgt über den Dreh/ Drückknopf.

4.2.5 Bewertung und Auswahl der Konzepte

Als Grundlage zur Bewertung der Visualisierungs- und Interaktionskonzepte werden die in Kapitel 4.1 vorgestellten Gestaltungsrichtlinien herangezogen. Dazu werden die einzelnen Grundsätze jeweils hinsichtlich deren Anforderungen auf den Referenzprozess analysiert und gegebenenfalls in verschiedene Kriterien unterteilt. Daraus ergibt sich folgende Bewertungsgrundlage⁹:

Informationsdarstellung

Für die Informationsdarstellung werden die Konzepte auf die Erfüllung der Grundsätze der DIN EN ISO 9241 geprüft.

- Klarheit (Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung, Schriftart und -größe, Strukturierung)
- Unterscheidbarkeit (Schriftgrößenvariation, Strukturierung, Farbe, Bewegung)
- Kompaktheit (Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung)
- Konsistenz (Schriftgröße, Strukturierung)
- Erkennbarkeit (Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung, Farbe, Bewegung, Strukturierung, Schriftgrößenvariation)
- Lesbarkeit (Schriftart und -größe, Randbereich)
- Verständlichkeit

Interaktion

Die Bewertung der Interaktion erfolgt ebenfalls anhand der Grundsätze aus der DIN EN ISO 9241. Da die Grundsätze der Interaktion zum Teil jedoch gegensätzlich

⁹ In den Klammern werden jeweils die entsprechenden Kriterien aufgeführt.

sind, werden die für das Forschungsprojekt wichtigeren Aspekte stärker berücksichtigt. Als Grundlage dafür dient eine Gewichtung der Grundsätze (vgl. Anhang D), welche die Aspekte der Gegensätzlichkeit derer berücksichtigt.

- Aufgabenangemessenheit (Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung, Form der Ein-/Ausgabe, Voreinstellung typischer Eingabewerte, Angepasste Dialogschritte)
- Selbstbeschreibungsfähigkeit (Zustandsinformation, Offensichtlichkeit der Interaktion)
- Steuerbarkeit (Selbstbestimmung der Interaktion, Rückstellen von Eingaben der Interaktion)
- Erwartungskonformität (Konsistenz der Interaktion, Benutzermerkmale, Rückmeldung vom System)
- Fehlertoleranz (Vermeiden von Fehlern, Korrekturaufwand)
- Individualisierbarkeit (Benutzeranpassung, Gestaltungsfreiheit)

Auf Basis dieser Bewertungsgrundlage für die Informationsdarstellung und Interaktion erfolgt die Bewertung der einzelnen Konzepte. Dabei werden die Konzepte zunächst hinsichtlich der einzelnen Grundsätze bzw. deren Kriterien bewertet, wobei eine Skala von 1 („Kriterium besonders schlecht erfüllt“) bis 5 („Kriterium besonders gut erfüllt“) zugrunde liegt. Da bei der vorliegenden Bewertung u. U. neutrale Aussagen möglich sind, wird eine ungerade Anzahl an Bewertungsabstufungen gewählt.

Um zudem die Bedeutung der Grundsätze im gegenseitigen Vergleich zu berücksichtigen und der Gegensätzlichkeit der Interaktions-Grundsätze gerecht zu werden, werden sämtliche Gestaltungsrichtlinien mit Hilfe einer Einflussmatrix gewichtet. Dies wird erneut für die Grundsätze der Informationsdarstellung und der Interaktion separat durchgeführt.

Auf Basis einer Nutzwertanalyse werden in einem letzten Schritt die Punkte¹⁰ aus der vorangegangenen Bewertung und die Gewichtung der Grundsätze multipliziert, woraus sich eine Gesamtpunktzahl für jedes der drei Konzepte ergibt. Diese lässt eine fundierte Aussage zum Vergleich der einzelnen Konzepte zu, wobei die Auswertun-

¹⁰ Da die Grundsätze zum Teil eine unterschiedliche Anzahl an Kriterien aufweisen, wird für jeden Grundsatz jeweils mit der durchschnittlichen Punktezahl gerechnet.

gen der Konzepte hinsichtlich Informationsdarstellung und Interaktion getrennt durchgeführt werden kann. Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der Bewertung zusammen, die einzelnen Bewertungen und Gewichtungen der Konzepte und Grundsätze finden sich in Anhang D wieder.

	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
Informationsdarstellung	3,17	3,47	3,66
Interaktion	2,65	2,51	2,77
GESAMT	5,82	5,97	6,43

Tabelle 6: Konzeptbewertung - Ergebnis

Mit Hilfe der Bewertung kann letztendlich eine Aussage getroffen werden, welche Gestaltungsgrundsätze im vorliegenden AR-System umsetzbar sind und worin die Schwerpunkte bei der Gestaltung des interaktiven AR-Systems liegen. Bei der Auswahl des Visualisierungs- und Interaktionskonzeptes stellt dementsprechend das Konzept „Imaginäres Band“ mit dem höchsten Nutzwert von 6,43 die Basis dar.

Zur endgültigen Gestaltung der Informationsdarstellung und Interaktion wird die Bewertung jedoch zusätzlich anhand der Einzelbewertungen der Grundsätze und Kriterien analysiert. Dadurch wird es möglich, die Schwachstellen des ausgewählten Konzeptes, bei welchen die Alternativkonzepte für einzelne Grundsätze oder Kriterien besser bewertet wurden, zu identifizieren und optimieren. Ein Beispiel dafür ist die Konsistenz in der Informationsdarstellung.

Durch iterative Optimierungszyklen, bei welchen u. a. auf Experteninterviews sowie Expertenevaluierungen zurückgegriffen wurde, kann letztlich ein finales Visualisierungs- und Interaktionskonzept festgelegt werden. Dabei wurde beispielsweise ein verbessertes Empfinden für die Informationsaufnahme festgestellt, wenn die Farbverteilung im Vergleich zu den Konzepten invertiert dargestellt wird, d. h. im Demonstrator des Forschungsprojektes wird weiße Schrift auf schwarzem Hintergrund visualisiert. Dies ist jedoch auf das verwendete HMD zurückzuführen und kann sich bei Verwendung eines anderen Displays unterschiedlich verhalten. Die letztlich umgesetzte Visualisierung wird in Abbildung 35 veranschaulicht.

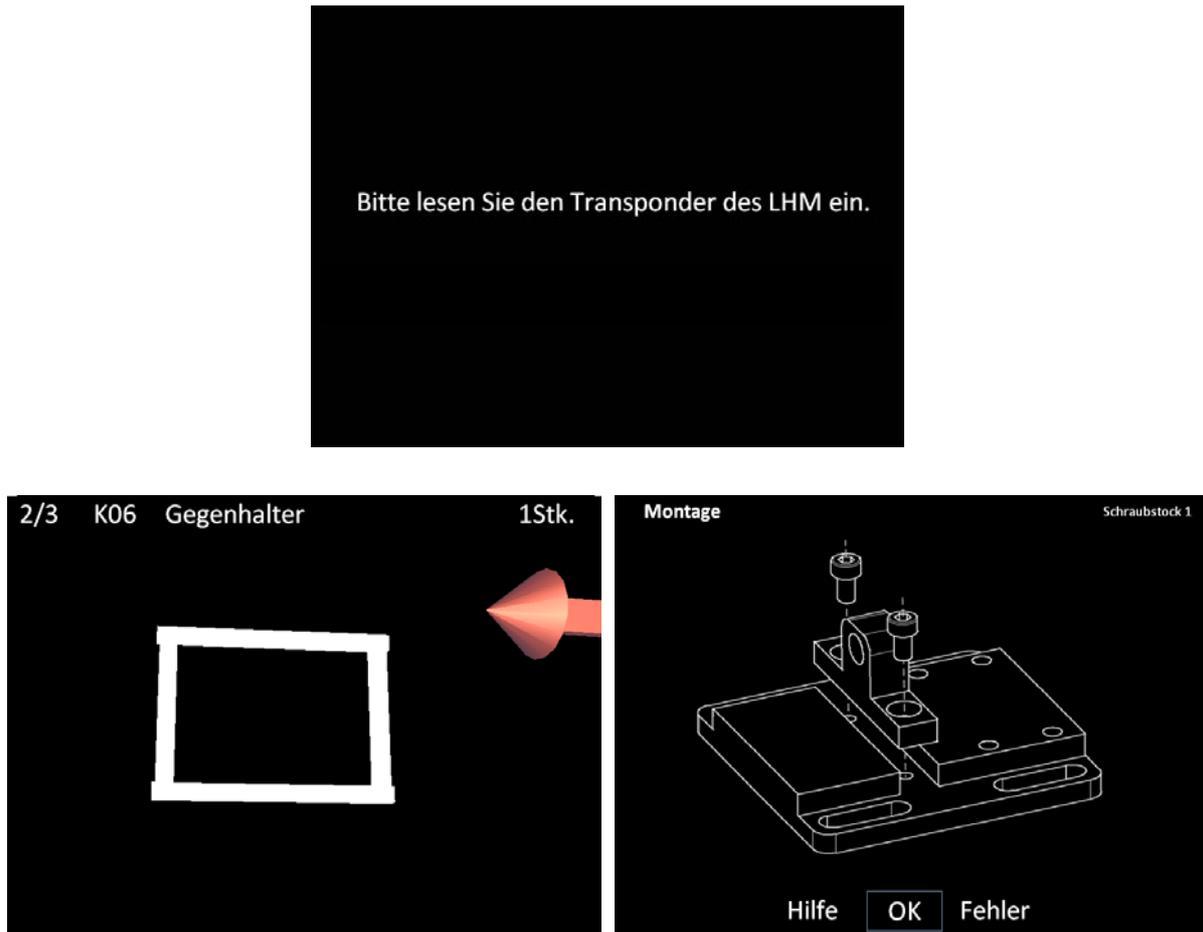


Abbildung 35: Visualisierungs- und Interaktionskonzept – Screenshots

Der grundlegende Prozessablauf im Referenzprozess wird in Kapitel 5 ausführlich betrachtet. Hinsichtlich der Informationsdarstellung und Interaktion geben Abbildung 36 und Abbildung 37 jedoch bereits einen zusammenfassenden Überblick über die benötigten Informationen sowie mögliche Interaktionen je Prozessschritt.

Nachdem sich der Nutzer im System mit dem persönlichen Benutzerkonto bzw. Benutzerprofil registriert hat, wird zunächst ein Auswahlm Menü angeboten, in dem der Nutzer bspw. einen neuen Auftrag starten kann. Zur Kommunikation mit dem System dient dem Anwender der Dreh-/ Drückknopf. Zum Starten eines neuen Auftrages wird der Nutzer aufgefordert einen Transponder an einem Kommissionier-Behälter oder einem Behälter mit vorkommissionierter Ware zu lesen.

In der Teilebereitstellung im Behälterlager wird der Nutzer bei der Entnahme von Komponenten aus einem Regallager unterstützt. Dazu benötigt er die Lagerplatznummer, sowie die Nummer und Anzahl des Artikels. Am Regalfach angekommen, wird die Entnahme des Artikels noch während des Griffes in das entsprechende La-

gerfach automatisch über den RFID-Handschuh quittiert. Erst nach erfolgreicher Quittierung wird die Information des nächsten Artikels angestoßen. Am Ende eines Teilauftrags für die montagenahe Kommissionierung wird der Nutzer angeleitet, den Transponder am fertig kommissionierten Behälter zu beschreiben. Die erforderlichen Informationen werden dabei über das Software-System bereitgestellt. Der Auftrag kann abgeschlossen und zur Montage weitergeleitet werden. Das System startet erneut die Visualisierung des Startmenüs.

Am Montagearbeitsplatz hat sich der Mitarbeiter genauso in das System eingeloggt und ein Profil gewählt. Nach dem Auslesen des Transponders am Behälter mit vor-kommissionierter Ware werden nun – aufgrund der im vorangegangenen Arbeitsschritt veränderten Transponderdaten – die für den Montagevorgang relevanten Informationen aufgerufen. Dabei werden die Montageschritte mit der jeweiligen Kleinteilekommissionierung aus dem KANBAN-Regal sequenziell angezeigt. Werden im anstehenden Montageschritt Kleinteile am Arbeitsplatz benötigt, werden die entsprechende Lagerplatznummer, der Artikelname sowie die benötigte Menge visualisiert. Zusätzlich wird der Nutzer durch eine dynamische Umrandung des aktuellen Lagerfaches bei der Wegfindung unterstützt. Neben der Bestätigung eines erfolgreich durchgeführten Arbeitsschrittes durch den Dreh-/ Drückknopf ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Interaktion durch die Auswahl eines Hilfemenüs bzw. eines Fehlermenüs zum Abbruch der aktuellen Aufgabe. Im Hilfemenü werden dem Mitarbeiter verschiedene Informationen zum Montageschritt angeboten (z. B. Explosionszeichnungen der Baugruppe, ausführlichere textuelle Beschreibung des Montageschrittes, Fotos der einzelnen Bauteile etc.). Im Fehlermenü kann der Mitarbeiter zwischen verschiedenen, kontextabhängig vordefinierten Fehlern wählen, welche zum Abbruch des aktuellen Auftrags führen. Findet der Mitarbeiter keinen passenden Fehler, kann der den Auftrag im letzten Eintrag des Fehlermenüs abbrechen. Eine Möglichkeit besteht nun darin, dass der Fehlertyp sowie der aktuelle Status des Auftrags über den am Behälter mitgeführten Transponder gespeichert werden. Zudem werden Informationen zum Mitarbeiter sowie ein Zeitstempel gespeichert.

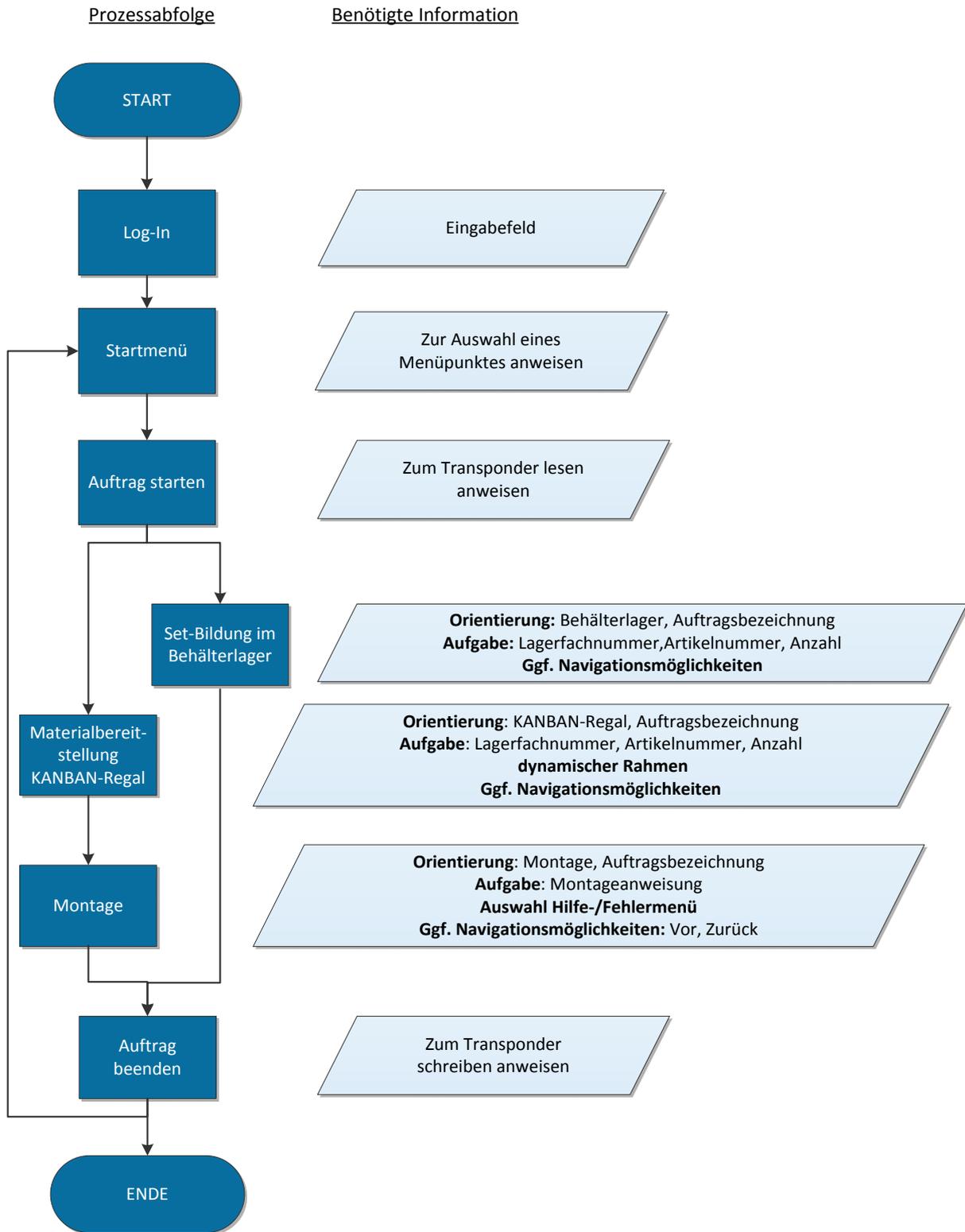


Abbildung 36: Informationsdarstellung im Referenzprozess

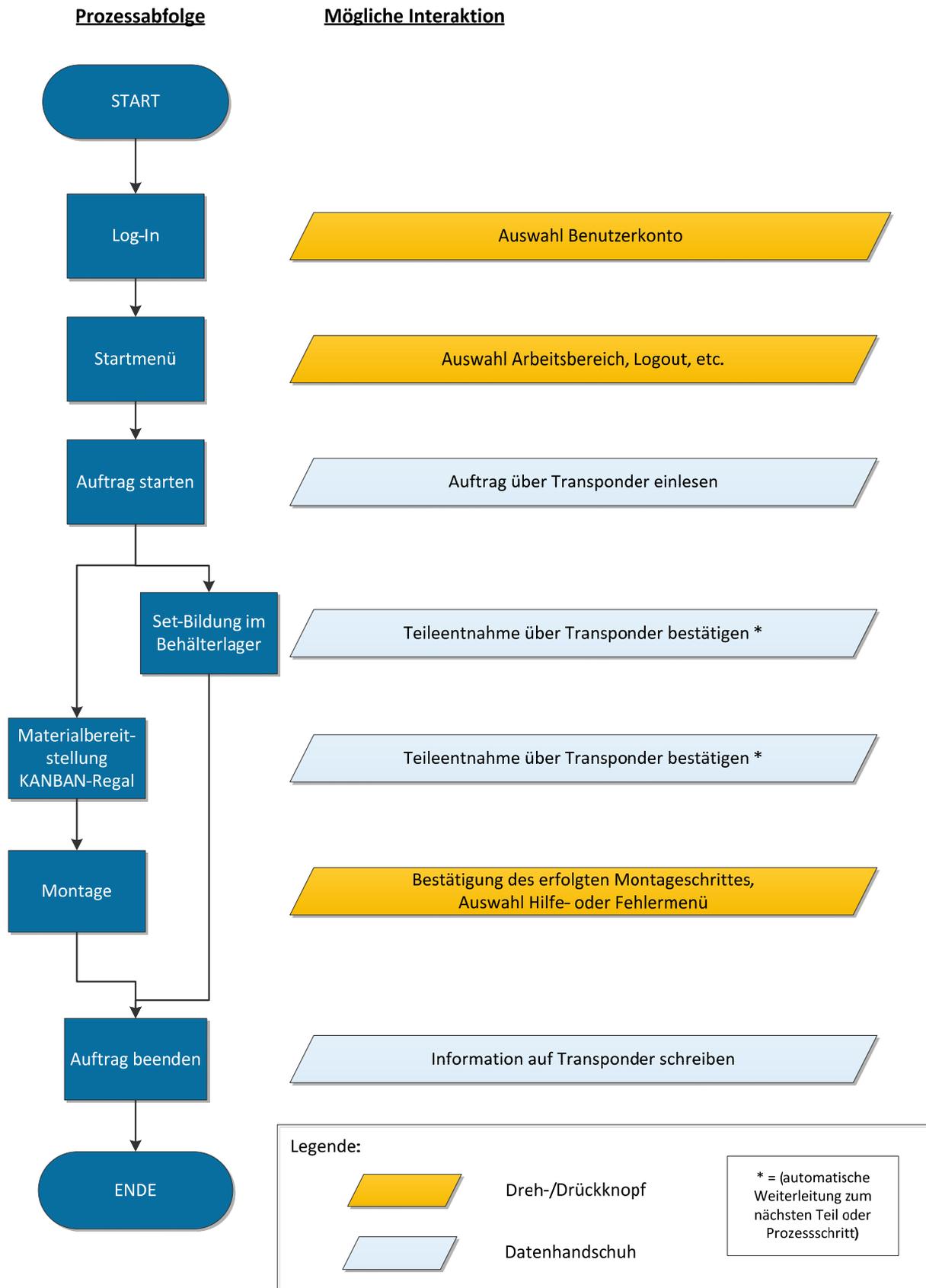


Abbildung 37: Interaktion im Referenzprozess

5 Entwicklung der Systemarchitektur und Basisgeräteumgebung

Nach einer umfangreichen Analyse potenzieller Einsatzszenarien für eine Kombination der beiden Zukunftstechnologien RFID und AR wird im ersten Teil des folgenden Abschnittes der Referenzprozess im Forschungsprojekt dargestellt. Dieser teilt sich in zwei Bereiche, die montagenahe Kommissionierung und die manuelle Montage. Im Anschluss daran werden die einzelnen Systemkomponenten beschrieben, welche in den beiden Funktionsmustern des Referenzprozesses Verwendung finden. Darauf aufbauend werden die beiden Funktionsmuster „Unterstützung von Montageprozessen durch RFID und AR“ sowie „RFID-unterstützte Kommissionierung“ hinsichtlich deren Funktion und Systemarchitektur analysiert. Beide Funktionsmuster wurden in Form eines Demonstrators im Versuchsfeld des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik umgesetzt.

5.1 Referenzprozess

Das Forschungsprojekt „Papierlose Produktion und Logistik“ verfolgt im Allgemeinen das Ziel, ein System zur Bereitstellung prozessrelevanter Informationen mittels RFID und AR zu entwickeln. Im weiten Umfeld „Produktion und Logistik“ gilt es daher, Einsatzbereiche des Zielsystems zu definieren, welche Potenzial zur Reduzierung nicht wertschöpfender Prozesse sowie zur Steigerung der Prozessqualität durch technische Unterstützung des Werkers mit sich bringen. Die Bereitstellung der Produkt- und Prozessinformationen basiert dabei auf Transpondern an Produkten, Behältern, Ladungsträgern oder Werkzeugen.

Das im Forschungsprojekt verfolgte Einsatzgebiet ist ein zweigeteilter Referenzprozess aus einem manuellen Montagearbeitsplatz mit einer vorgelagerten, montage-nahen Kommissionierung (vgl. Abbildung 38).

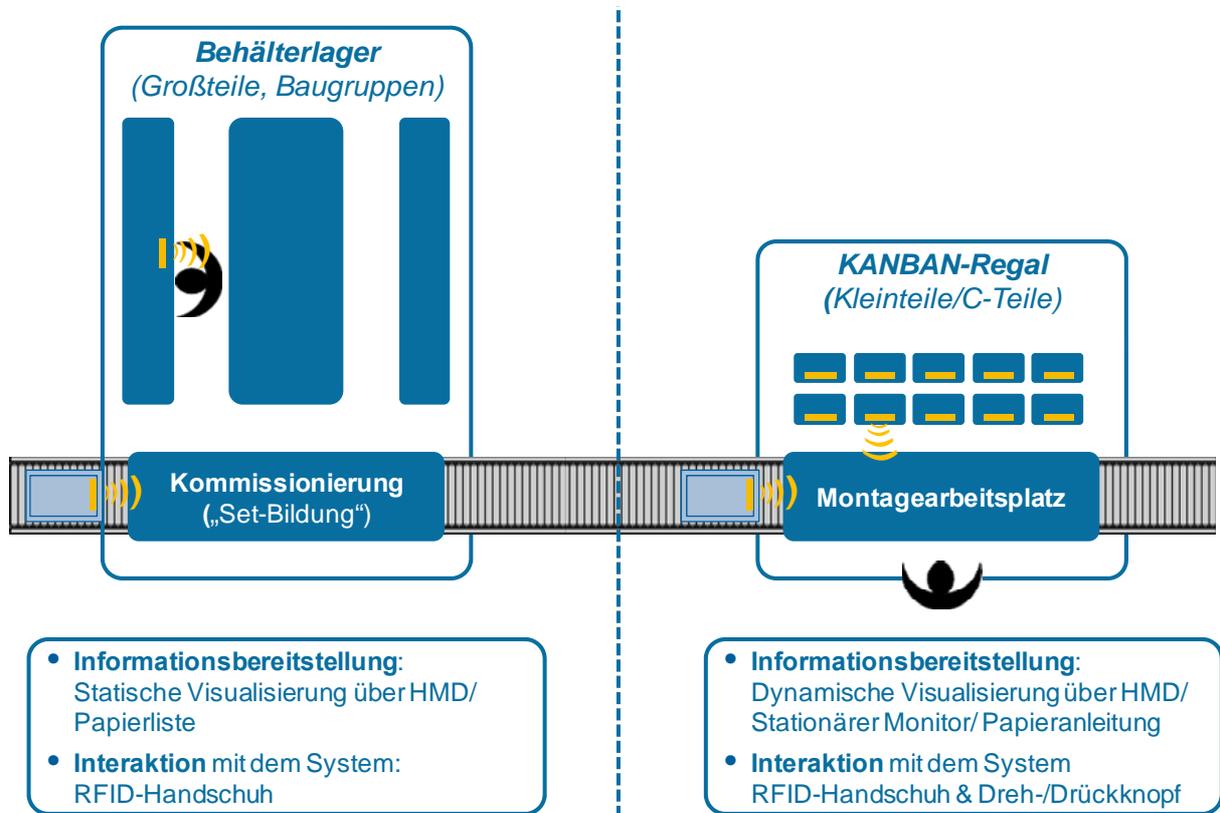


Abbildung 38: Referenzprozess – Übersicht

Der gesamte Referenzprozess startet mit der Auslösung des Auftrags in der montage-nahen Kommissionierung durch die Erfassung eines am Kommissionier-Behälter applizierten Transponders. Daraufhin werden dem Mitarbeiter der Lagerplatz, die Artikelnummer sowie die zu entnehmende Artikelmenge angezeigt. Die Visualisierung dieser Informationen erfolgt entweder statisch über das HMD oder analog über eine papierbasierte Kommissionierliste. Im Anschluss daran geht der Mitarbeiter zum ersten Lagerplatz des Kommissionier-Auftrages und entnimmt die geforderte Menge. Während des Greifvorgangs wird durch den RFID-Handschuh ein am Lagerplatz befestigter Transponder erfasst, welcher in einer Datenbank mit dem entsprechenden Lagerplatz und dadurch auch mit dem entsprechenden Artikel verknüpft ist. Über einen SOLL-IST-Abgleich des Lagerplatzes wird die Entnahme verifiziert und eine akustische Rückmeldung zur Entnahme ausgegeben. Dabei können zwei Varianten unterschieden werden:

5 Entwicklung der Systemarchitektur und Basisgeräteumgebung

- Ein positives Signal des RFID-Handschuhs bestätigt eine korrekte Entnahme. Das System geht automatisch zur nächsten Position des Auftrages über und der folgende Artikel mit den relevanten Informationen wird angezeigt. Die Kommissionierung kann dementsprechend fortgesetzt werden.
- Ein negatives (Warn-) Signal weist auf einen Fehler bei der Entnahme hin, da der Transponder eines falschen Lagerplatzes erfasst wurde. Das System geht folglich nicht zur nächsten Position über. Solange kein positiver SOLL-IST-Abgleich des Lagerplatzes durchgeführt wurde, steht der Kommissionierprozess still und das System „wartet“ auf den korrekten Transponder, d. h. auf den korrekten Lagerplatz bzw. Artikel.

Wurden alle Positionen erfolgreich entnommen, kann die montagenahe Kommissionierung mit einem abschließenden Schreibvorgang des Transponders am Kommissionier-Behälter beendet werden. Dabei wird der Auftragsstatus von „Kommissionierung“ auf „Montage“ verändert, sodass beim folgenden Lesevorgang die für den Montagevorgang relevanten Informationen angefordert werden. Abbildung 39 veranschaulicht den Prozessablauf zusammen.

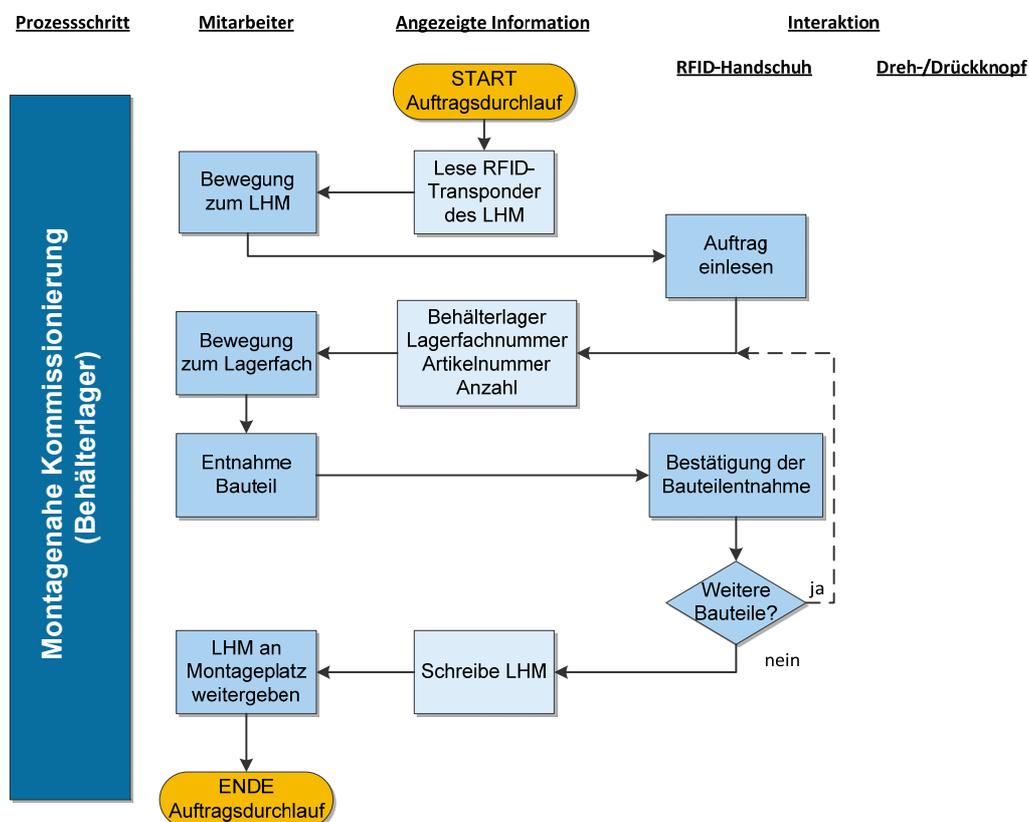


Abbildung 39: Referenzprozess - Montagenahe Kommissionierung

5 Entwicklung der Systemarchitektur und Basisgeräteumgebung

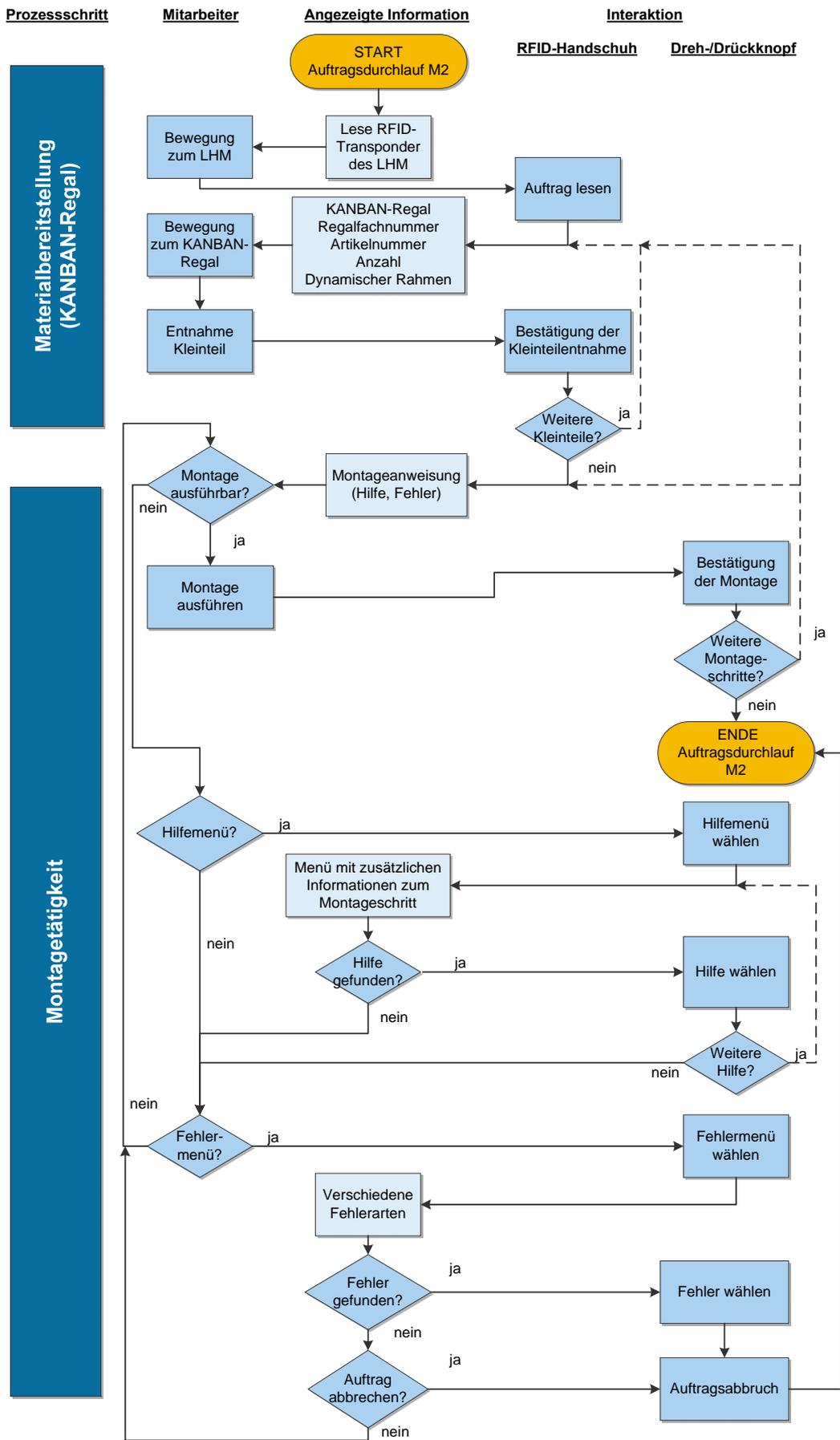


Abbildung 40: Referenzprozess - Manuelle Montage

Der Mitarbeiter in der manuellen Montage löst den Auftrag analog zur montagenahen Kommissionierung durch das Erfassen des Transponders am Behälter aus. Daraufhin werden sequentiell die einzelnen Montageschritte abgehandelt, welche jeweils aus der Materialbereitstellung aus dem Kommissionier-Behälter sowie aus einem KANBAN-Regal am Montagearbeitsplatz¹¹ und der eigentlichen Montageanweisung besteht (vgl. Abbildung 40). Die Visualisierung der Informationen erfolgt – wie im Zielsystem angestrebt – über ein head-mounted Display, kann jedoch mit alternativen Visualisierungsmedien (stationärer Monitor, papierbasierte Montageanweisung) verglichen werden. Für den Fall des HMD unterstützt eine dynamische Visualisierung eines Rahmens über dem entsprechenden Lagerplatz den Mitarbeiter beim Greifvorgang aus dem KANBAN-Regal, die Bestätigung der Entnahme erfolgt analog zur montagenahen Kommissionierung über eine akustische Rückmeldung des RFID-Handschuhs. Wurden alle Kleinteile für den anstehenden Arbeitsschritt bereitgestellt, wird – ohne zusätzliche Interaktion durch den Nutzer – die Montageanweisung angezeigt. Mit Hilfe dieser Anweisung kann i. d. R. der Arbeitsschritt durchgeführt werden. Den erfolgreichen Abschluss des Arbeitsschrittes quittiert der Mitarbeiter mit dem Dreh-/ Drückknopf, woraufhin die nächste Sequenz aus Materialbereitstellung und Montageanweisung angefordert wird.

Kann der Montageschritt nicht durchgeführt werden, bieten sich dem Nutzer zwei Möglichkeiten, welche beide über den Dreh-/ Drückknopf bedient werden können. Über das Hilfemenü kann der Nutzer auf zusätzliche Informationen zurückgreifen, über das Fehlermenü kann der Auftrag abgebrochen werden und eine Fehlermeldung auf dem „Master“-Transponder festgehalten werden.

5.2 Komponenten des Systems

Im folgenden Abschnitt werden auf Basis der Definitionen und Erläuterung in Kapitel 2 die im Forschungsprojekt verwendeten Systemkomponenten erläutert. Dabei wird sowohl auf Hardware- als auch auf Softwarekomponenten eingegangen.

¹¹ Die Materialbereitstellung von Kleinteilen aus dem KANBAN-Regal ist nicht zwingend erforderlich.

5.2.1 Mobiles RFID-Schreib-/ Lesegerät

Als RFID-Schreib-/ Lesegerät findet in der vorliegenden Arbeit der mobile RFID-Reader UDL15 Verwendung, ein Vorserienmodell der Fa. Deister electronic GmbH (vgl. Abbildung 46, links). Der RFID-Handschuh wird am Handgelenk getragen, die Antenne befindet sich am Fingerrücken. Dadurch wird es möglich, RFID-Transponder an Produkten, Ladungsträgern oder Lagerplätzen zu erfassen ohne dabei die gewohnte Bewegung des Werkers zu verändern. In seiner Grundfunktion überträgt das mobile RFID-Lesegerät die aus den Transpondern gelesenen Daten über eine kabellose Schnittstelle (Bluetooth) an eine zentrale Recheneinheit. Dort werden nicht nur die relevanten Prozessinformationen gehalten, sondern auch die Auswertung und Interpretation der Transponderdaten durchgeführt. Zu den Komponenten des mobilen Lesegerätes zählen neben der (Finger-) Antenne und dem eigentlichen HF-Modul (inkl. Controller) dementsprechend lediglich eine Kommunikationseinheit sowie die Stromversorgung. Durch die Verlagerung der RFID-Antenne an die Finger des Nutzers wird der Tatsache Rechnung getragen, dass nur die Transponder gelesen werden, mit denen auch tatsächlich interagiert wird.

Die Bluetooth-Schnittstelle wird durch das Betriebssystem der stationären Recheneinheit verwaltet, so dass der Zugriff wie auf eine konventionelle serielle COM-Schnittstelle erfolgt. Die Daten, die in den COM-Port geschrieben bzw. von diesem gelesen werden, entsprechen einer speziellen Befehls- bzw. Antwortstruktur im hexadezimalen System [Dei-08].

2*Dummy	SOC	DST	SRC	CMD	Data	CRC	STOP
0xFF 0xFF	0xFD	0x25	0x11	0XX	YYYY	0ZZ 0ZZ	0xFE

Tabelle 7: Befehlsnachricht im deBus Protokoll [Dei-08]

- DUMMY: Die Dummybytes werden gesendet, um sicherzustellen, dass das erste Schriftzeichen der Nachricht korrekt empfangen wird. Falls die Dummybytes nicht korrekt empfangen werden, wird die Nachricht nicht interpretiert.
- SOC: Beginn des Befehls
- DST: Busadresse des Zielgerätes
- SRC: Busadresse des Senders des Befehls

- CMD: Art des Befehls
- Data: Parameter, die je nach Art des Befehls variieren
- CRC: 16 Bit Prüfsumme aller Bytes, außer Dummy und Stop
- STOP: Ende des Befehls

Die vom Reader gesendeten Antworten sind ähnlich aufgebaut wie die gesendeten Befehle:

2*Dummy	SOM	DST	SRC	CMD	ERR	Data	CRC	STOP
0xFF 0xFF	0xFB	0x11	0x25	0XX	0x00	YYYY	0xZZ 0xZZ	0xFE

Tabelle 8: Antwortnachricht im deBus Protokoll [Dei-08]

- SOM: Beginn der Antwort-Nachricht
- ERR: Fehlercode der Antwort (zwischen 0x00 und 0x1F bei keinem Fehler)
- Data: Je nach Art der Antwort zwischen 0 und 120 Bytes Daten

Die für die vorliegende Arbeit bedeutendsten Befehle sind:

- Änderung des Lesemodus (CMD = 0x0A): Bei aktiviertem Polling-Modus (Data = 0x01) werden die gelesenen Transponder erst übermittelt, wenn der Reader dazu aufgefordert wird. Im Report-Modus (0x02) werden die Daten sofort übertragen.
- An- und Ausschalten der Antenne (CMD = 0x81): Die Antenne des mobilen Lesegerätes wird aus- (0x00) bzw. angeschaltet (0xFF).
- Blockweises Lesen (CMD = 0x83): Es werden die Anzahl der zu lesenden Blöcke (Data = NUM), die Art des Tags (TAG), der Startblock (Block) und die EPC-Nummer des Tags (SNR) festgelegt
- Blockweises Schreiben (CMD = 0x84) erfolgt analog zum blockweisen Lesen. Die zu schreibenden Daten werden hinter der SNR angefügt.

5.2.2 RFID-Transponder

Im Referenzprozess sorgen verschiedene Transponder an unterschiedlichen Orten innerhalb des Prozesses zur Bereitstellung relevanter Informationen. So dienen Transponder an Behältern bspw. als zentrale Instanz für die Speicherung der Auftragsdaten oder zur Unterstützung der manuellen Kommissionierung. Transponder

an (metallischen) Produkten können wiederum zur Speicherung von Produktdaten – auch nach dem Montageprozess – Verwendung finden. Bei der Auswahl der für den Referenzprozess geeigneten Transponder gilt es daher, verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Neben einer mindesterforderlichen Lesereichweiten auf verschiedenen Applikationsuntergründen (Produkte, Behälter, Lagerplätze etc.) bestehen u. a. Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Transponders hinsichtlich der verfügbaren Speicherkapazität und der geometrischen Maße. In Folge dessen wurden innerhalb des Referenzprozesses zwei Transponder-Typen mit unterschiedlichen Eigenschaften gewählt.

Das Label ALN-9640 Squiggle der Fa. Alien Technology eignet sich für verschiedene, nicht-metallische Anwendungen und wird daher zur Kennzeichnung der Behälter und Lagerplätze im System verwendet. Die relativ großen Abmessungen (ca. 100 x 15 mm) stellen für die Kennzeichnung größerer Objekte kein Problem dar. Des Weiteren ist auf dem Transponder der EPCglobal Gen2 (V 1.2.0) sowie ISO/IEC 8000-6C kompatible Speicher Higgs 3 verbaut. Dieser bietet bei einem 96 Bit EPC einen zusätzlichen, frei verfügbaren Bereich (User Memory) von 512 Bit. Obgleich die Speicherkapazität keine großen Datenmengen zulässt, können die notwendigen Informationen wie Auftragsnummer, Auftragsstatus, Zeitstempel, verantwortliche Personen etc. in codierter Form hinterlegt werden. Abbildung 41 fasst zudem das Leistungsvermögen des Transponders bzgl. der theoretisch maximal erreichbaren Lesereichweite auf einem Frequenzbereich von 800 bis 1000 MHz zusammen. Das Diagramm veranschaulicht eine Messung des Transponders auf dem Applikationsmaterial PP der Stärke 5 mm, womit die Eigenschaften eines Kleinteilebehälters simuliert werden. In einem kalibrierten Raum wird der Transponder dazu mittig auf einer Materialprobe (Abmessungen: 500 x 500 x 5 mm) aufgeklebt. Mit Hilfe eines Messsystems wird auf verschiedenen Frequenzen die erforderliche Leistung gemessen, die zum erfolgreichen Auslesen der Transponderdaten benötigt wird. Aus Basis der gemessenen Werte kann dann die theoretisch erreichbare Lesereichweite des Transponders abgeleitet werden.

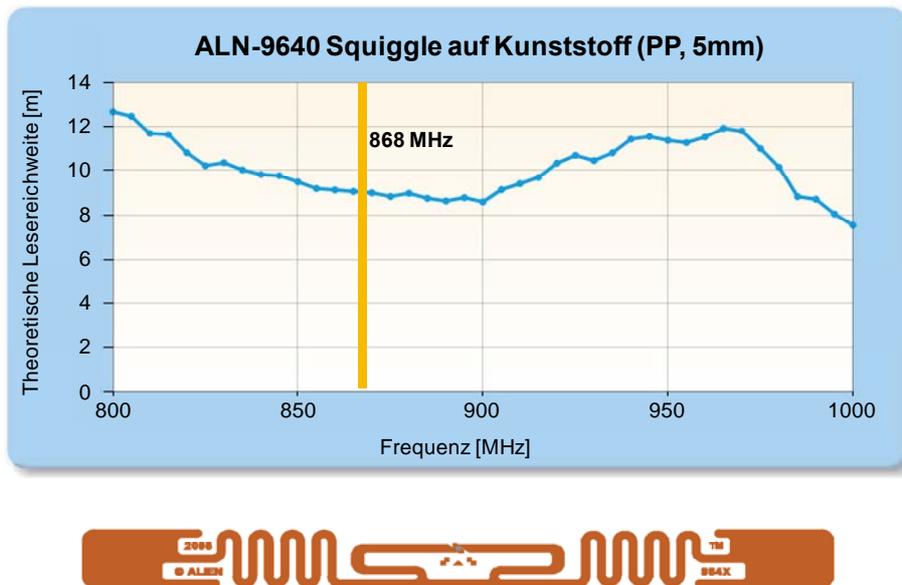


Abbildung 41: Theoretische Lesereichweite ALN-9640 Squiggle (li.), Produktbild¹² (re.)

Die Kurve zeigt, dass der Transponder eine konstant gute Funktionalität über den Frequenzbereich von 800 bis etwa 970 MHz aufweist. Für das in Europa freigegebene UHF-Frequenzband um 868 MHz – auf dem auch das mobile RFID-Lesegerät arbeitet – kann eine theoretische Reichweite von etwa 9 Metern festgehalten werden. Zwar wird für die Anwendung des mobilen RFID-Lesegerätes im Referenzprozess lediglich eine Reichweite von wenigen Zentimetern gefordert, die hohe Lesereichweite steht jedoch ebenso für ein sicheres Erfassen des Transponders, auch bei geringen Leseleistungen.

Zur Kennzeichnung metallischer Komponenten finden häufig sog. On-Metal-Tags Anwendung. Antenne und IC dieser Transponder werden in einem Gehäuse verbaut, welches direkt auf Metall appliziert werden kann. Zur Anbringung eines Datenträgers auf dem Montageobjekt im Referenzprozess¹³ wurde dementsprechend ein solcher Transponder ausgewählt. Zudem bestehen in diesem Fall erhöhte Anforderungen an die Größe des Transponders, da aufgrund der Objektgröße und -abmessungen lediglich eine äußerst begrenzte Fläche verfügbar ist. Auf Basis dessen wird mit dem Mini Metal Special Tag H3 der Fa. SkyRFID Inc. ein Transponder ausgewählt, welcher denselben Speicher wie der ALN-9640 Squiggle nutzt und zudem durch seine

¹² Quelle: Werbematerial der Firma Alien Technology

¹³ Nahezu sämtliche Komponenten des Montageobjektes werden aus Aluminium hergestellt.

geringen Abmessungen (25,5 x 9 x 3 mm) überzeugt. Die erreichbare Lesereichweite des Transponders auf metallischem Untergrund zeigt Abbildung 42.



Abbildung 42: Theoretische Lesereichweite Mini Metal Special Tag H3 (li.), Produktbild¹⁴ (re.)

Im Vergleich zum Transponder ALN-9640 Squiggle kann für den Frequenzbereich um 868 MHz eine deutlich geringere Lesereichweite realisiert werden (< 2 m). Für das Lesen und Schreiben eines Transponders auf dem Montageobjekt ist diese jedoch ausreichend. Während die Transponder an den Behältern bspw. beim Griff in ein Lagerfach intuitiv während des natürlichen Greifvorgangs gelesen werden müssen, wird für das finale Beschreiben des Transponders am Montageobjekt nach Beendigung der Montage ein etwas höherer Aufwand akzeptiert. So kann der RFID-Handschuh bewusst in die Nähe des Transponders geführt werden, wodurch auch für den zweiten Transponder-Typ ein sicheres Lesen gewährleistet werden kann.

5.2.3 Head-mounted Display

Für die Visualisierung prozessrelevanter Informationen existieren verschiedene im industriellen Umfeld verbreitete Lösungen. Von einfachen Papierbelegen bis hin zu technisch ausgereiften Systemen wie Pick-by-Light oder Pick-by-Voice sind gerade für die Kommissionierung verschiedene Systeme im täglichen Arbeitsumfeld erprobt.

¹⁴ Quelle: Werbematerial der Firma SkyRFID Inc.

Im Bereich der manuellen Montage stellen beispielsweise stationäre (Touchscreen-) Terminals eine Alternative zur Bearbeitung der Aufträge anhand von papierbasierten Anleitungen dar. Vor allem in Bereichen, in denen der Mitarbeiter beide Hände zur freien Verfügung haben muss, können head-mounted Displays jedoch zur Optimierung der Arbeitsabläufe beitragen. Die mitunter größten Potenziale bieten die kopfbasierte Datenbrillen dabei für die Bereiche Montage und Kommissionierung. Die Ursachen von Kommissionierfehlern sind beispielsweise häufig in einer schlechten Informationsbereitstellung begründet [Cro-07]. Über eine verbesserte visuelle Darstellung durch eine kontextbezogene Bereitstellung der Informationen zum aktuellen Prozessschritt und eine optische Hervorhebung des aktuellen Lagerplatzes können Fehler vermieden werden. Innerhalb von Montageprozessen können HMD helfen, eine hohe Variantenvielfalt zu beherrschen sowie bei der Bearbeitung komplexer Arbeitsanweisungen oder hochwertiger Produkte zu unterstützen. Wo kundenindividuelle Produkte hohe organisatorische Anforderungen an Produktion und Logistik stellen und prozessrelevante Informationen nur auf Umwegen bereitgestellt werden können, unterstützen Datenbrillen eine fehlerfreie Montage der Produkte durch die Visualisierung von Informationen am richtigen Ort (ausführliche Arbeitsanweisungen, Stücklisten, Explosionszeichnungen etc.).

Die Entwicklung von head-mounted Display, welche sich für einen dauerhaften Einsatz in industrieller Umgebung eignen, ist jedoch wenig fortgeschritten und stagnierte während der Projektlaufzeit. Auf Grundlage einer kontinuierlichen Recherche und eines Vergleichs der am Markt verfügbaren Displays hinsichtlich der Projektanforderungen an Größe, Gewicht, Bauart, Kosten etc. wurde das Display LE-750A der Fa. Liteye für die Verwendung im Referenzprozess ausgewählt (vgl. Abbildung 43).

Das Optical see-through Display arbeitet nach mit der OLED-Technologie und bietet bei einer Auflösung von 800 x 600 Pixeln ein Field-of-View von 28°. Das Gewicht des Displays beträgt ohne Berücksichtigung des erforderlichen Gestells 80 g und wird über einen SVGA-Anschluss (Daten) sowie einen USB-Port (Spannung) mit einem Rechner verbunden. Ein spezieller Treiber ist daher nicht erforderlich. Da das HMD eine kabelgebundene Ansteuerung benötigt, muss der Nutzer den Rechner stets bei sich tragen, sodass im Projekt auf ein Notebook zurückgegriffen wird. Das

LIFEBOOK P770 der Firma Fujitsu Technology Solutions GmbH ist dabei durch den verbauten Vierkernprozessor Intel® Core™ i7 mit 1.06 GHz mehr als ausreichend für die zugrunde liegende Software. Das Gewicht von 1,4 kg ist im Vergleich zu anderen Laptops relativ gering, für eine dauerhafte Anwendung in industrieller Umgebung jedoch durch ein alternatives Rechnersystem zu ersetzen.



Abbildung 43: Produktbild Liteye LE-750A¹⁵

5.2.4 Trackingsystem

Wie bereits in den Grundlagen erläutert, ist für die dynamische Visualisierung von Informationen die Bestimmung von Position und Orientierung des Mitarbeiters im Raum bzgl. eines Bezugskordinatensystems erforderlich. Mit Hilfe dieses Trackingsystems wird es möglich, die relevanten Informationen in Abhängigkeit der Bewegungen des Nutzers auf dem HMD zu visualisieren.

Als beispielhafte Umsetzung eines Trackingsystem wird der Nutzer im Funktionsmuster „Montageunterstützung“ im Rahmen der Materialbereitstellung aus dem KANBAN-Regal bei der Wegfindung unterstützt. Pfeile in Richtung des relevanten Lagerplatzes sowie ein Rahmen über der entsprechenden Bereitstellereinheit führen den Mitarbeiter dabei zielgerichtet an den korrekten Entnahmeort. Zudem wird direkt an dem ortsfest positionierten Rahmen die Entnahmemenge visualisiert, sodass der Mitarbeiter keine weiteren Informationen benötigt, um die erforderliche(n) Komponente(n) zu entnehmen (vgl. Abbildung 44).

¹⁵ Quelle: Werbematerial der Firma Liteye Systems, Inc.



Abbildung 44: Einsatz eines Trackingsystems zur Hervorhebung des Lagerfachs

Die wesentlichen Hardwarekomponenten bei dem im Funktionsmuster umgesetzten optischen Markertracking, welches auf der Erfassung zweidimensionaler quadratischer Papiermarker beruht, sind eine Kamera sowie die am Demonstrator verbauten Marker (siehe Abbildung 44 bzw. Abbildung 45, rechts). Die Technologie bringt eine ausreichende Genauigkeit bei der Aufnahme der Position und Orientierung mit sich und weist bspw. gegenüber optischen Infrarot-Trackingsystemen in den meisten Anwendungen einen erheblichen Kostenvorteil auf. Da der Sichtbereich der Kamera jedoch nicht immer den gesamten Bereich des KANBAN-Regals erfassen kann, wird über jedem Lagerfach ein Marker angebracht. Dadurch wird sichergestellt, dass sich stets mindestens ein Marker im Sichtkegel der Kamera befindet.



Abbildung 45: Komponenten des Trackingsystems im Referenzprozess¹⁶

Um aus der Position eines Markers nun die globalen Koordinaten der Kamera und dementsprechend die Position sowie die Orientierung des Mitarbeiters zu erhalten,

¹⁶ Quelle: Werbematerial der Firma IDS Imaging Development Systems GmbH

wird eine Konfigurationsdatei benötigt, die die relative Lage der verschiedenen Marker zueinander beschreibt. Neben der Anzahl der verwendeten Marker befinden sich dort – zugeordnet zur jeweiligen ID des Markers – Informationen zur Kantenbreite, zum Ursprung innerhalb des Markers und zu einer Transformationsmatrix, welche die Rotation bzw. Translation relativ zu einem globalen Zentrum beinhaltet. Die der jeweiligen Situation zugehörigen Daten werden an den Szenengenerator übergeben, welcher wiederum den Input für das Anzeigegerät generiert. Die virtuellen Objekte bzw. Daten können dem Anwender somit in die richtige Perspektive zur realen Umgebung angezeigt werden.

Zur Umsetzung des Trackingsystem wird die USB-Kamera uEye XS der Firma IDS Imaging Development Systems GmbH verwendet, welche sich u. a. durch einen CMOS Farbsensor und eine maximale Auflösung von 8 Megapixel auszeichnet. Zudem verfügt die Kamera über einen Bildstabilisierer und kann aufgrund der geringen Abmessungen ohne Probleme am HMD montiert werden (vgl. Abbildung 45, links). Zur softwaretechnischen Realisierung des Tracking Systems wird das Unifeye SDK der Firma metaio in der Version 3.5 eingesetzt und in die Software des Funktionsmusters integriert. In Kombination mit der kalibrierten Kamera und den ortsfest positionierten Papiermarkern kann mit Hilfe dieser Tracking Bibliothek sowie der Konfigurationsdatei die eigentliche Erkennungsroutine eingesetzt werden.

5.2.5 Interaktionsgeräte

Über das Interaktionsgerät kann der Nutzer eigenständig in die Steuerung des Systems eingreifen und Aktionen am Kommunikationssystem durchführen. Bei der Auswahl und Gestaltung der Interaktion gilt es jedoch, auf eine strikte Reduzierung der notwendigen Eingaben in das System zu achten. Das RFID-AR-System soll dem Mitarbeiter in Produktion und Logistik als zusätzliche Hilfestellung dienen. Unnötige Handgriffe zur Steuerung sind möglichst gering zu halten, da diese einerseits keine Wertschöpfung innerhalb der Arbeitsaufgabe darstellen und andererseits die Nutzerakzeptanz des Systems gefährden. Die Gestaltung der Interaktion muss daher die Durchführung der wesentlichen Interaktionsschritte mit möglichst wenigen Handgriffen unterstützen.

Für das Interaktionssystem können grundsätzlich drei Aufgabentypen unterschieden werden: Die Navigation, die Selektion oder Manipulation sowie die Konfiguration und Steuerung der gesamten AR-Anwendung. Da der Nutzer des Zielsystems lediglich ein HMD zur Visualisierung der Informationen zur Verfügung hat und er sich zudem verstärkt auf seine Kernaufgabe konzentrieren soll, wird die Konfiguration und Steuerung des Gesamtsystems hier nicht berücksichtigt. Die notwendigen Vorgänge erfolgen in einem einmaligen Aufwand an einem stationären Rechner und werden im Anschluss daran in das System eingespeist. Das Interaktionsgerät im RFID-AR-System muss daher zwei Aktionen abdecken, die Bestätigung eines Sachverhaltes, einer ausgeführten Tätigkeit oder eines ausgewählten Menüpunktes und die Auswahl aus Menüs oder Listen. Weitere Interaktionen wie Buchstaben- oder Zahleneingaben lassen sich gegebenenfalls über eine Zeichenliste realisieren, sind jedoch grundsätzlich zu vermeiden, da diese einen erhöhten Zeitaufwand verursachen. Für die beiden Aufgabentypen stehen im Forschungsprojekt zwei Geräte zur Verfügung, der RFID-Handschuh zur Bestätigung von Aktionen und der Dreh-/ Drückknopf der Firma Griffin Technology zur Auswahl und Bestätigung (vgl. Abbildung 46).



Abbildung 46: Interaktionsgeräte – RFID-Handschuh (li.) und Dreh-/ Drückknopf¹⁷ (re.)

Im Sinne des Ambient Intelligence dient das mobile RFID-Lesegerät nicht nur zur reinen Identifikation der Transponder an Produkten, Ladungsträgern oder Lagerplätzen, sondern findet ebenso Verwendung als Interaktionsgerät zwischen Mensch und Maschine. Durch das nahezu unbemerkte und automatische Erfassen definierter Transponder kann der RFID-Handschuh in Verbindung mit der dahinterliegenden Softwarearchitektur den Nutzer durch seinen Arbeitsablauf navigieren. Wird bei einem Arbeitsschritt beispielsweise ein bestimmter, im Raum befindlicher RFID-

¹⁷ Quelle: Werbematerial der Firma Griffin Technology, Nashville, USA.

Transponder gelesen, kann diese Tätigkeit im System als „abgeschlossen“ verbucht werden und die Ausgabe der Informationen für den folgenden Arbeitsschritt angestoßen werden. Die Identifikation des Transponders symbolisiert dabei die Bestätigung eines erfolgreich durchgeführten Arbeitsschrittes. Entnimmt der Mitarbeiter in der Kommissionierung bspw. einen Artikel aus einem Lagerfach, bewegt er während des Greifvorgangs den RFID-Handschuh in den Sende-/ Empfangsbereich des Transponders. Dadurch erfolgt automatisch und ohne Zutun des Nutzers die Bestätigung der Entnahme. Diese wird über eine kabellose Schnittstelle an das System übermittelt. Repräsentiert nun jeweils ein RFID-Transponder einen bestimmten Arbeitsschritt, kann der Nutzer mit Hilfe der während der Tätigkeiten unbewusst gelesenen Transponder durch seinen gesamten Arbeitsablauf geführt werden.

Um jedoch weitere Interaktionen ausführen zu können, welche über eine reine Bestätigung hinausgehen, wird als weiteres Eingabegerät der Dreh-/ Drückknopf gewählt. Dieser kann bspw. in die Kleidung des Nutzer integriert werden oder stationär am Arbeitsplatz montiert werden und kann in Produktivumgebung ohne Probleme mit Handschuhen bedient werden. Durch die geringe Anzahl an Eingabemöglichkeiten (linksherum, rechtsherum, drücken) wird eine vereinfachte Eingabe unterstützt und die Wahrscheinlichkeit von Fehleingaben verringert. Dabei werden das Drehen zur Auswahl aus Menüs oder Listen und das Drücken zur Bestätigung verwendet.

5.3 Entwicklung eines Systems zur Unterstützung von Montageprozessen

Im folgenden Abschnitt wird das erste Funktionsmuster des im Referenzprozess definierten Einsatzbereiches beschrieben. Dazu werden zunächst die Gründe für die Auswahl des Montageobjektes dargestellt. Im Anschluss daran wird auf die hybride Datenspeicherung der prozessrelevanten Informationen, das im Funktionsmuster verwendete Trackingsystem sowie den am Lehrstuhl fml entstandenen Demonstrator eingegangen.

5.3.1 Das Montageobjekt im Funktionsmuster

Zur Veranschaulichung der Potenziale durch eine papierlose Informationsbereitstellung zur Unterstützung von Montageprozessen wurde für die Funktionsmuster im Forschungsprojekt ein Demonstrator entwickelt. Dabei galt es für das System zur Unterstützung von Montagetätigkeiten, durch die Auswahl eines möglichst repräsentativen Montageobjektes die in industrieller Umgebung häufig auftretende Montageschritte bzw. Fügeprozesse zu berücksichtigen. Dadurch wird verhindert, dass im Demonstrator ein spezifischer Einsatzfall abgebildet wird, welcher u. a. auch spezifische Anforderungen an die Informationsbereitstellung mit sich bringt. Neben der Klassifizierung der Montagetätigkeiten aus Kapitel 2.3.1.2 dient eine Studie über das Auftreten unterschiedlichee Montageprozesse in der Konsumgüterindustrie als Grundlage für die Berücksichtigung häufig vorkommender Montageprozesse und damit als Basis für die Auswahl des Montageobjektes für das Funktionsmuster „Montageunterstützung“.

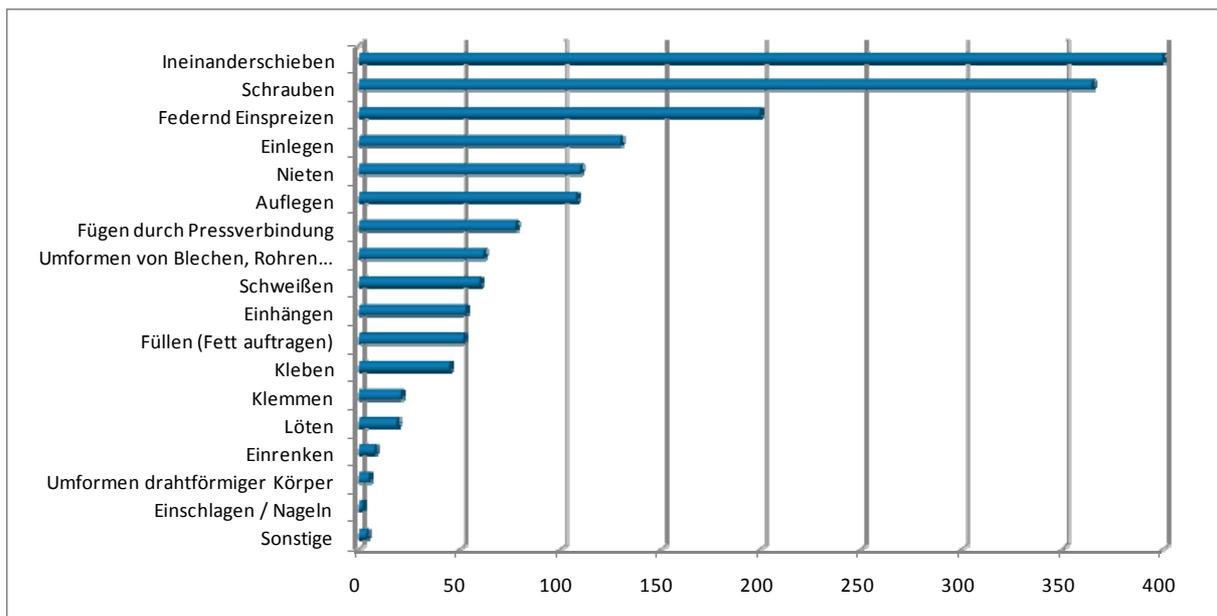


Abbildung 47: Montageprozessen in der Konsumgüterindustrie (in Anlehnung an [iw-08])

Aus Abbildung 47 wird ersichtlich, dass die beiden Prozesse „Ineinanderschieben“ und „Schrauben“ bereits einen erheblich Anteil an den in der Konsumgüterindustrie vorkommenden Montageprozessen einnehmen. Des Weiteren sind mit relativ hohem Anteil die Prozess „Federnd Einspreizen“, „Einlegen“, „Nieten“ und „Auflegen“ zu nennen.

Neben der Verwendung verschiedener Fügeverfahren in Anlehnung an die Ergebnisse der Studie werden bei der Auswahl des zu montierenden Produktes weitere Aspekte berücksichtigt:

- Möglichkeit zur Variantenbildung
- Möglichkeit zur abschließenden Sicht- und Funktionsprüfung
- Möglichkeit zur Bildung von (vormontierten) Baugruppen
- Demontierbarkeit zur mehrfachen Wiederverwendbarkeit des Produktes
- Einfache Montage und Demontage

Die Eigenschaften und Funktionalitäten eines Schraubstockes decken sämtliche Anforderungen an die Auswahl des Montageobjektes ab, sodass ein auf die Anforderungen entsprechendes Produkt konstruiert und in der lehrstuhlinterne Werkstatt gefertigt wurde (vgl. Abbildung 48).

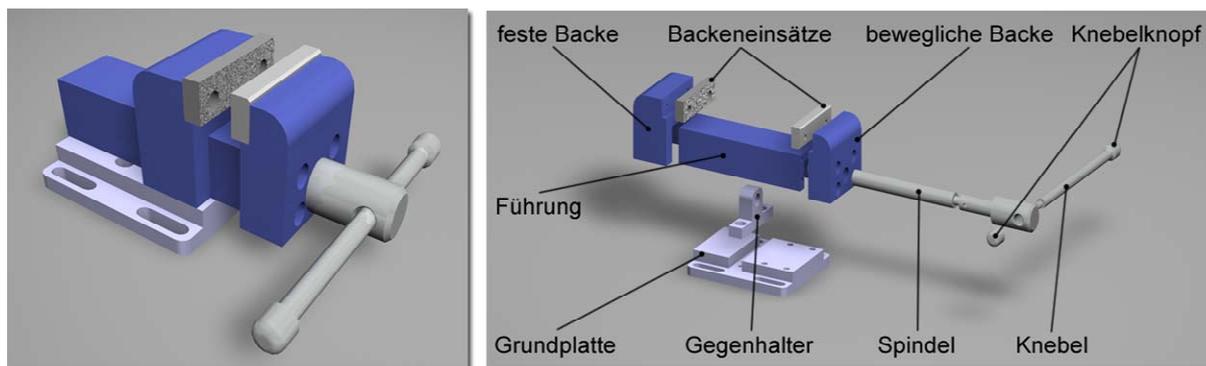


Abbildung 48: Montageobjekt Schraubstock

Die zur Montage des Schraubstocks erforderlichen Fügeprozesse umfassen u. a. die Tätigkeiten Ineinanderschieben, Schrauben, Einlegen und Auflegen und decken damit einen hohen Anteil häufig vorkommender Montageprozesse ab. Zudem bietet der Schraubstock Möglichkeiten zu einer abschließenden Sicht- und Funktionsprüfung des Klemmmechanismus sowie zur Bildung von Varianten. So können beispielsweise die Bohrungen in der Grundplatte, die Backeneinsätze oder die Lackierung der Komponenten variiert werden. Mit Hilfe verschiedener, auffällig gestalteter Elemente der Visualisierung kann über das HMD auf diese Besonderheiten im Montageprozess hingewiesen werden und somit ein Potenzial der kontextbezogenen Informationsbereitstellung genutzt werden. Des Weiteren kann die Montage in unterschiedlichem Umfang durchgeführt werden. Dabei ist es möglich, einzelne Bau-

gruppen bereits vormontiert zu kommissionieren und damit die Montagezeit erheblich zu verkürzen. Der Schraubstock besteht insgesamt aus 27 Komponenten. Vier Komponenten werden als „Großteil“ definiert und in die montagenahe (Vor-) Kommissionierung integriert (Grundplatte, Backen etc.), die restlichen 23 Komponenten sind Kleinteile, welche im KANBAN-Regal am Montagearbeitsplatz bereitgestellt werden (Schrauben, Backeneinsätze, Gewindestangen etc.).

Der Montagevorranggraph aus Abbildung 49 verdeutlicht die Zusammensetzung des Schraubstocks und damit die Möglichkeiten hinsichtlich der Bildung von Baugruppen und bildet die Basis für die Definition der Datenhaltung der für den Referenzprozess relevanten Informationen.

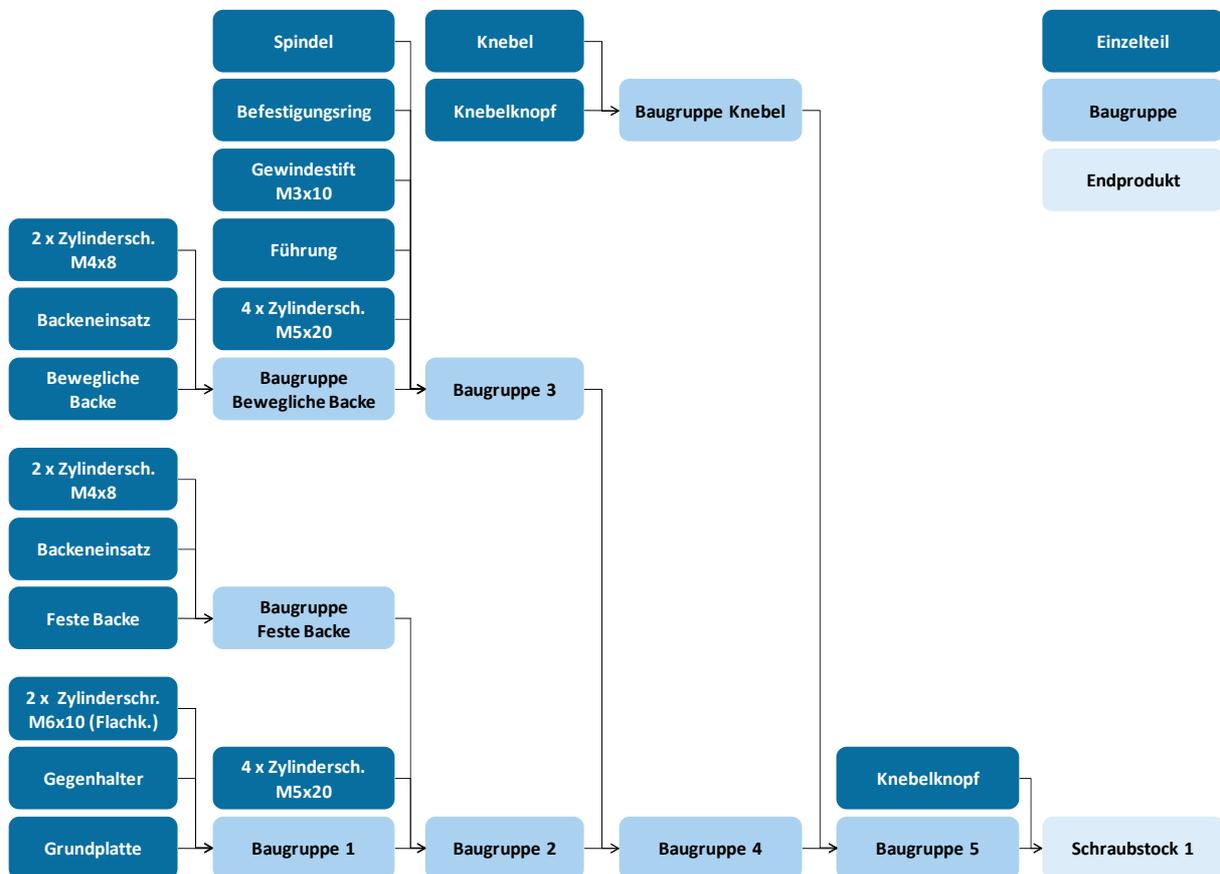


Abbildung 49: Montagevorranggraph

5.3.2 Datenhaltung im Funktionsmuster „Montageunterstützung“

Zur Definition der Datenhaltung im Funktionsmuster werden zunächst die eingesetzten Systemtranspondern mit den jeweiligen Anbringungsorten beschrieben. Zudem

werden die prozessrelevanten Daten definiert und in Form eines Datenhaltungskonzeptes in zentrale und dezentrale Elemente aufgeteilt.

5.3.2.1 Kopplung von Informations- und Materialfluss

Die Verwendung von RFID-Transponder als Informationsträger in der Montage beruht auf der Grundidee, den Informationsfluss an den Materialfluss zu binden. Dafür werden im Referenzprozess verschiedene Konstellationen berücksichtigt. Die Applikation der Transponder erfolgt auf drei verschiedenen Objekten:

- Je ein Transponder am **(Auftrags-) Behälter**: Der zentrale Transponder im System. Hier werden sämtliche Informationen zum Auftrag mitgeführt bzw. mit einer zentralen Datenbank verlinkt. Zu Beginn der Montage erfolgt der Anstoß des Auftrags über diesen Transponder.
- Je ein Transponder je **Lagerplatz** zur Bestätigung und Verifikation der Entnahme (für die Entnahme aus Behältern können die Transponder alternativ auch am jeweiligen Behälter angebracht werden, siehe Kapitel 5.4).
- Je ein Transponder am **Basisbauteil** des montierten Schraubstocks (Grundplatte): Hier werden Informationen zum Produkt hinterlegt, welche auch nach Fertigstellung der Montage am Bauteil verbleiben (Zeitstempel des Montageabschlusses, Montagemitarbeiter, verbaute Komponenten etc.)

Der Verwendungszweck der jeweiligen Transponder variiert dabei und reicht von der Steuerung des Montageauftrags (geschlossener Kreislauf) über die Verifikation der manuellen Kommissionierung (geschlossener Kreislauf) bis hin zur dauerhaften Speicherung von Produktdaten bspw. für Wartungs- oder Serviceaufgaben (offener Kreislauf). Beim geschlossenen Transponder-Kreislauf hat neben der Funktionalität die Lebensdauer des Datenträgers eine besondere Bedeutung bei der Auswahl des Transponders. Ähnliches gilt für offene Kreisläufe, wobei hier zudem die Kosten der „Einweg-Transponder“ verstärkt berücksichtigt werden müssen.

5.3.2.2 Definition prozessrelevanter Daten

Die Analyse der Informationsstruktur in verschiedenen Unternehmen ergab, dass Produkt- oder Prozessinformationen bisher meist in Form von Dokumenten am oder in der Nähe des Montagearbeitsplatzes bereitgestellt werden. Dabei finden ver-

schiedene Formen der Bereitstellung wie Begleitbelege, Ordner oder Standfahnen Verwendung. Die Informationsstruktur äquivalenter Dokumente ist für unterschiedliche Unternehmen jedoch ähnlich. Auf den Dokumenten oder Montagevorschriften finden sich allgemeine Informationen, welche neben organisatorischen Daten auch Auftrags- oder Variantennummern beinhalten. Zusätzlich werden in der Regel Stücklisten sowie diverse Barcodes zur Verfügung gestellt, um eine weitere Informationsverarbeitung oder -beschaffung auslösen zu können. Diese starke Ähnlichkeit in diesem Hauptdokument der Montage ist beispielhaft dafür, dass gewisse Kategorien an Informationen in der Montage relevant sind. Die Kategorien betreffen das Produkt, den Prozess, die verwendeten Betriebsmittel sowie die Organisation.

Werden die für Montageprozesse bestehenden Dokumente nun in die vier Kategorien eingeordnet (vgl. Abbildung 50), wird deutlich, dass viele Daten gestreut in verschiedenen Dokumenten vorliegen. So geben 3D-Modelle und Konstruktionszeichnungen bspw. hauptsächlich Daten zum Produkt bzw. den verwendeten Bauteilen wieder, Montageanweisungen können jedoch sowohl Prozessdaten (z. B. Abfolge der Montageschritte) als auch Daten zu den Betriebsmitteln (z. B. Beschreibungen der Funktion) entnommen werden.



Abbildung 50: Dokumentenorientierte Informationsstruktur

Durch eine dokumentenorientierte Informationsstruktur kann daher kein eindeutiger und durchgängiger Informationsfluss gewährleistet werden. Neben der Betrachtung der allgemeinen Informationsstruktur ist anzumerken, dass verschiedene Dokumente desselben Typs (z. B. Montageanweisung) keinen einheitlichen Aufbau aufweisen.

Die Gestaltung der Dokumente und Beschreibung der Inhalte erfolgt häufig individuell je nach Verfasser. Redundante oder gar inkonsistente Strukturen können zur Folge haben, dass die für die jeweilige Tätigkeit relevanten Dokumente oder die relevanten Daten auf dem Dokument erst gesucht und identifiziert werden müssen. Dies verursacht wiederum eine unter Umständen deutliche Erhöhung der Prozesszeiten. Ebenso können Informationen fehlen.

Um den Problemen einer dokumentenorientierten Informationsstruktur entgegenzutreten, werden die für den Referenzprozess relevanten Informationen anwendungs- bzw. datenbankorientiert in den vier Kategorien Produkt, Prozess, Betriebsmittel und Organisation gruppiert. Dies birgt die Vorteile einer eindeutigen Datenstruktur ohne Redundanzen. Die erforderlichen Informationen können somit automatisiert, strukturiert und schnell über das head-mounted Display bereitgestellt werden. Die Daten müssen so nicht aus verschiedenen Dokumenten extrahiert werden. Sie liegen in einem Netz modularer Felder vor und können leicht aus dem zentralen Informationssystem gezogen werden.



Abbildung 51: Datenbankorientierte Informationsstruktur im Referenzprozess (in Anlehnung an [Rad-99])

Des Weiteren ist erkennbar, dass die datenbankorientierte Informationsstruktur auch eine Kopplung unterschiedlichster Datenformate unterstützt. Im Bereich der Produktdaten lassen sich neben textuellen Teilebeschreibungen bspw. Zeichnungen oder 3D-Modelle realisieren, was ein weites Spektrum zur Informationsbewirtschaftung eröffnet.

5.3.2.3 Entwicklung des Datenhaltungskonzeptes

Durch die Verwendung eines RFID-Systems wird im Forschungsprojekt ein materialbegleitender Informationsfluss realisiert. Daher gilt es, die Art und Menge an Informationen zu definieren, die den physischen Materialfluss sinnvollerweise begleiten. [Arn-98]. In diesem Zusammenhang können drei Formen der Datenhaltung unterschieden werden: Zentrale Datenhaltung, dezentrale Datenhaltung sowie eine hybride Datenhaltung als Mischform aus den beiden genannten Varianten. Wenn alle objektbezogenen Daten lokal auf einen Transponder geschrieben sind und keinerlei Verbindung zu anderen Informationssystemen existiert, liegt eine durchgängig dezentrale Datenhaltung vor. Im Gegensatz dazu hält eine zentrale Datenhaltung alle Daten zentral in einem oder mehreren Informationssystemen vor. Dabei wird häufig eine Identifikationsnummer ausgelesen und die zugeordneten Informationen zentral aus dem Informationssystem angefordert. Bei der hybriden Datenhaltung werden lokal gespeicherte, objektbezogene Daten mit zentral verwalteten Informationen zum gleichen Objekt kombiniert. Die Möglichkeit, Daten aus der Montage zurückzugeben, ist bei allen drei Arten gewährleistet.

Alle Datenhaltungskonzepte weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf. Hervorzuheben ist bspw. der unterschiedliche Bedarf an Hardwarekomponenten zwischen zentralen und dezentralen Datenstrukturen. Die zentrale Datenhaltung erfordert einen hohen Verkabelungs- und Steuerungsaufwand, während bei der dezentralen Datenhaltung nur wenige Kontaktpunkte zu zentralen Informationsstrukturen eingeplant werden, den sogenannten Identifikationspunkten. Hauptvorteil der zentralen Datenhaltung ist das Nutzen von gemeinsamen Datenressourcen. Zum Beispiel können Montageanweisungen zentral nach Produktvariante abgefragt werden. Die Stärke der hybriden Datenhaltung liegt in der produktindividuellen Auslegung des Datenhaltungskonzeptes. Dabei kann bspw. das Ziel sein, nur eine Art Laufkarte für die Montage auf dem Transponder mitzugeben, während weiterführende Informationen zentral abgefragt werden müssen. Daraus kann sich eine Optimierung der Datenabfrage mit gleichzeitiger Reduzierung des Datenvolumens auf den Transpondern ergeben.

Prinzipiell wird bei allen Datenhaltungskonzepten am Prozessanfang, d. h. beim Auslösen eines Montageauftrags, ein mit objektbezogenen Daten beschriebener

Transponder ausgelesen. Der entsprechende Umfang der Daten variiert hierbei nach der Art der Datenhaltung. Auf Basis der in Kapitel 5.3.2.1 vorgestellten Systemtransponder basiert das für den Referenzprozess gewählte Datenhaltungskonzept auf einer hybriden Datenhaltung, d. h. auf einer Mischung aus zentralen (Data-on-Network) und dezentralen (Data-on-Tag) Elementen. Der Großteil der Daten befindet sich in einer zentralen, netzwerkfähigen Datenbank (Montageanweisungen, Einträge im Hilfemenü, Einträge im Fehlermenü). Weitere Informationen wie bspw. die Auftrags-Nummer, der Auftrags-Status (Kommissionierung/Montage) oder die den Montageprozess abschließenden Informationen werden jedoch dezentral auf den Transpondern mitgeführt. Abbildung 52 fasst die dezentral auf den verschiedenen Objekten mitgeführten Informationen zusammen:

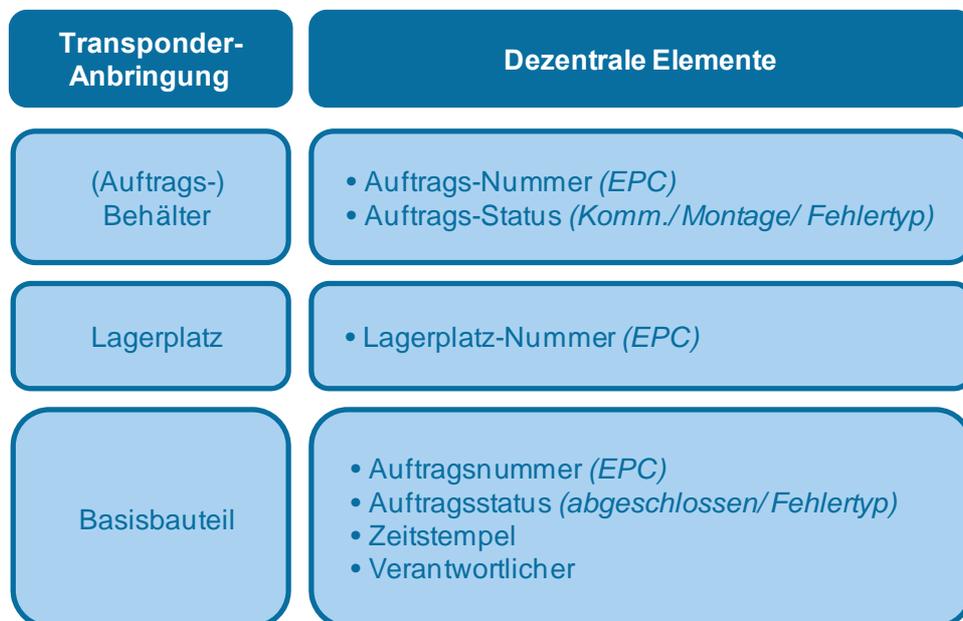


Abbildung 52: Dezentrale Datenhaltung im Referenzprozess

Zur Realisierung der zentralen Datenbankstruktur existieren Datenbanksysteme verschiedener Anbieter wie bspw. Microsoft SQL Server, Microsoft Access oder Oracle. Um einen möglichst effizienten Aufbau der Datenbank zu ermöglichen, wird im Forschungsprojekt Microsoft Access verwendet. Dieses Programm bietet neben der Speicherung der Daten in den Tabellen die Möglichkeit, Abfragen, Formulare oder Berichte zu erstellen. Der Aufbau der Datenbank wird dabei von einer grafischen Benutzeroberfläche unterstützt, bei der die Ergebnisse jederzeit sofort sichtbar sind. Orientiert an die Struktur und den Prozessablauf in Access wird so die Implementie-

rung in die (Gesamt-) Software des Funktionsmusters auf Basis der Hochsprache Microsoft C#.NET erleichtert.

Um die Tabellenstruktur zu definieren, ist es sinnvoll, ein Modell der realen Welt anzufertigen. Man spricht bei dieser abstrakten, formalen Beschreibung eines Ausschnittes der wahrgenommenen Welt von einem semantischen Datenmodell. Auch in der Realität existieren Objekte, die miteinander in Beziehung stehen. Für den Referenzprozess sind dies bspw. Endprodukte des Montageobjektes, die in mehreren Montageschritten zusammengebaut werden. Dieses Datenmodell lässt sich in verschiedenen Modellierungssprachen darstellen. Die häufigste Form ist das Entity-Relationship-Modell. Es dient als Grundlage einer konkreten Formulierung des Datenmodells für das Design der relationalen Datenbank. Das Modell für den Referenzprozess wird in Abbildung 53 dargestellt. Die Bedeutungen der einzelnen Tabellen werden im Anschluss erläutert:

- **tbl_Endprodukte:** Neben dem bereits integrierten Namen und EPC des Produktes sind Informationen zu Größe, Abmessungen, Gewicht etc. des Endproduktes denkbar. Die EPC-Nummer spiegelt die Nummer des Transponders auf dem Kommissionier-Behälter wieder, der die Basis des Montageauftrags darstellt.
- **tbl_Bauteile:** Sämtliche Bauteile werden mit Name und Lagerplatz abgelegt. Als Bauteile gelten auch vormontierte Unterbaugruppen, da sie sich logisch nicht von den normalen Bauteilen unterscheiden.
- **tbl_Montageschritte:** In der zentralen Tabelle der Datenbank werden alle durchzuführenden Tätigkeiten des Mitarbeiters gespeichert. Ebenso können hier qualitätssichernde Prüfschritte eingegeben werden, denen keine zu verbauenden Teile zugeordnet sind. Soll eine besonders wichtige Information bspw. zum Hinweis auf eine Variante im Prozess dargestellt werden, wird diese in der Spalte „ms_Hinweis“ abgelegt. Diese Informationen werden durch Blinken besonders hervorgehoben.
- **tbl_Transponder:** In dieser Tabelle finden sich die elektronischen Produktcodes (EPC) der Lagerplatztransponder.
- **tbl_Hilfemenue:** Im Hilfemenü befinden sich alle Hinweise, welche den Mitarbeiter im Bezug auf den jeweiligen Montageschritt unterstützen. Dazu zählen

bspw. ausführliche Beschreibungen der auszuführenden Tätigkeit oder Grafiken, welche die Montage verdeutlichen.

- **tbl_Fehlercodes:** Um eine spätere Nachbesserung fehlerhafter Produkte zu vereinfachen, werden die aufgetretenen Fehler dokumentiert. Potenzielle Fehler werden dazu im Vorfeld definiert und in der Datenbank hinterlegt, sodass die Fehlertypen ohne großen Aufwand an das System übermittelt werden können.
- **LINK_ep_ms:** Verknüpfung von Endprodukt und benötigten Montageschritten.
- **LINK_ms_bt:** Verknüpfung der Montageschritte mit den benötigten Bauteilen.
- **LINK_lp_tp:** Verknüpfung der Lagerplätze mit entsprechenden Transpondern.
- **LINK_ms_hm:** Verknüpfung der Montageschritte mit den verfügbaren Einträgen des Hilfemenüs.
- **LINK_ms_fc:** Verknüpfung der Montageschritte mit möglichen Fehlertypen.

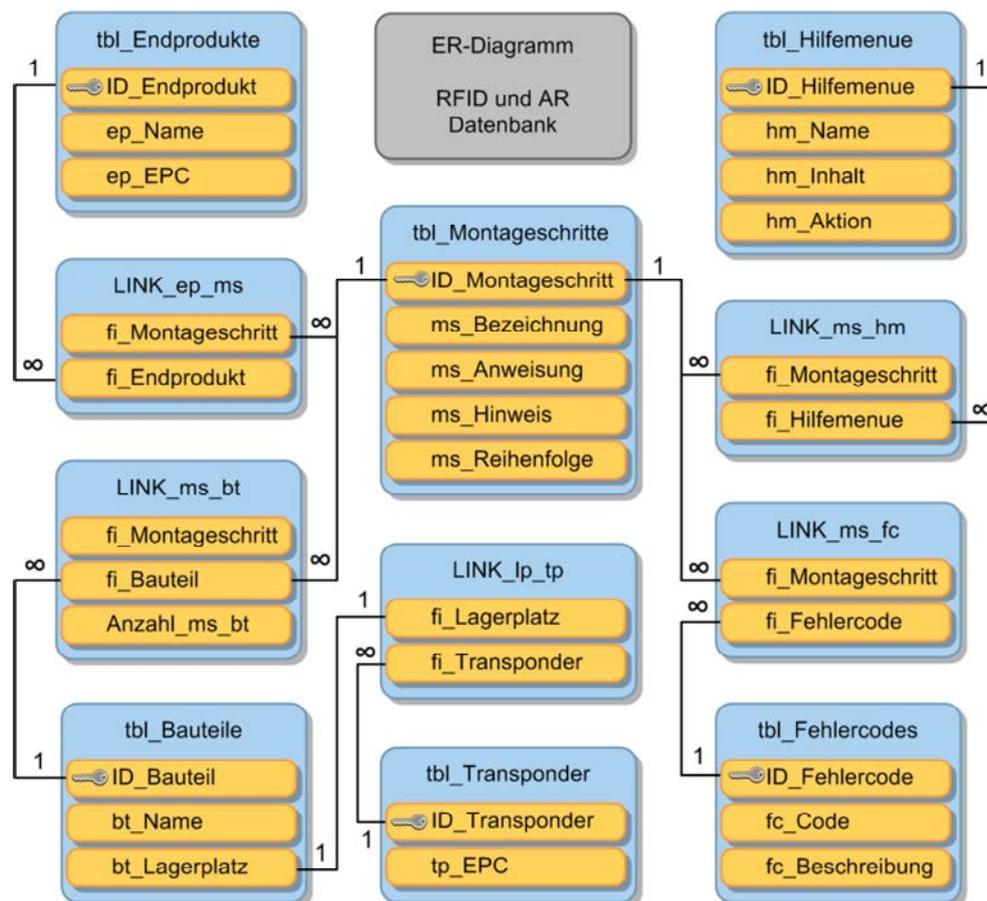


Abbildung 53: Entity-Relationship-Modell der zentralen Datenbank im Referenzprozess

5.3.3 Umsetzung des Funktionsmusters am Demonstrator

Am Beispiel der Perlenkettensteuerung, welche vor allem in der Automobilindustrie als erfolgsversprechendes Konzept zur Aufrechterhaltung der physischen Reihenfolge der (Fahrzeug-) Aufträge gilt [Mei-09], kann das Potenzial des Funktionsmusters zur Unterstützung von Montageprozessen veranschaulicht werden. Bei ungeplanten Stillständen im Produktionsablauf oder unvorhersehbaren Schwankungen der geplanten Ausbringungsleistung vorgelagerter Fertigungsprozesse muss dabei jedoch sichergestellt werden, dass sich Produktion und Materialfluss weiterhin in einem Takt befinden. Zur Beherrschung von Veränderungen der Soll-Auftragsreihenfolge in Produktions- oder Montageprozessen kann ein RFID-gestütztes System Anwendung finden, welches die Verknüpfung zum jeweiligen Auftrag sowie zu sämtlichen prozessrelevanten Informationen dezentral auf einem Transponder am Produkt oder Behälter mitführt.

Das beschriebene System zur papierlosen Produktion und Logistik verfolgt den Ansatz, einen Behälter als Referenz zum zugeordneten Kommissionier- und Montageauftrag mit einem RFID-Transponder im UHF-Bereich zu kennzeichnen. Dieser Transponder beinhaltet Informationen zur Auftragsnummer sowie zum aktuellen Stand der Bearbeitung und stellt das Bindeglied für den Abruf zusätzlicher Informationen aus einer zentralen Datenbank dar. Werden in einer der Montage vorgelagerten Kommissionierung mehrere Aufträge anhand von mehreren Behältern parallel bearbeitet, kann bei der Abgabe eines Artikels in den Behälter zunächst überprüft werden, ob der Artikel korrekt abgelegt und somit dem richtigen Auftrag zugeordnet wurde. Bei einer fehlerhaften Abgabe kann über eine akustische Rückmeldung durch das mobile RFID-Lesegerät oder das am Kopf getragene Display ein Warnhinweis ausgegeben werden. Somit kann eine stabile Auftragsfolge durch eine korrekte Versorgung der nachfolgenden Montagetätigkeit sichergestellt und die Perlenkettensteuerung aufrecht erhalten werden. Zu Beginn der Montagetätigkeit kann der Transponder am auftragspezifischen Behälter zudem genutzt werden, um die Visualisierung der relevanten Informationen zu den darauffolgenden Arbeitsschritten anzustoßen und den Nutzer somit durch den Prozess zu führen.

Bei Unsicherheiten im Bezug auf die korrekte Durchführung eines Montageschrittes ermöglicht die kontextbezogene Visualisierung über das head-mounted Display ge-

rade für unerfahrene Mitarbeiter oder bei spezifischen Varianten, auf zusätzliche Informationen aus einer zentralen Datenbank zurückzugreifen. Dazu ist neben einer kabellosen Schnittstelle zum zentralen Datenbank-Server ein zusätzliches Interaktionsgerät notwendig, um durch das bereitgestellte Hilfemenü zu navigieren. So können neben ausführlichen Beschreibungen des Arbeitsschrittes bspw. Stücklisten, Zeichnungen der einzelnen Bauteile oder Explosionszeichnungen bei der Bearbeitung des Produktes unterstützt. Für den Fall einer Sondervariante im Montageprozess, welche sich durch ein sehr geringes Auftreten von der gewöhnlichen Montage unterscheidet, kann ein Hervorheben von variantenspezifischen Informationen auf die Besonderheit hinweisen und somit eine fehlerhafte Bearbeitung verhindern. Abbildung 54 zeigt die Komponenten des Systems.

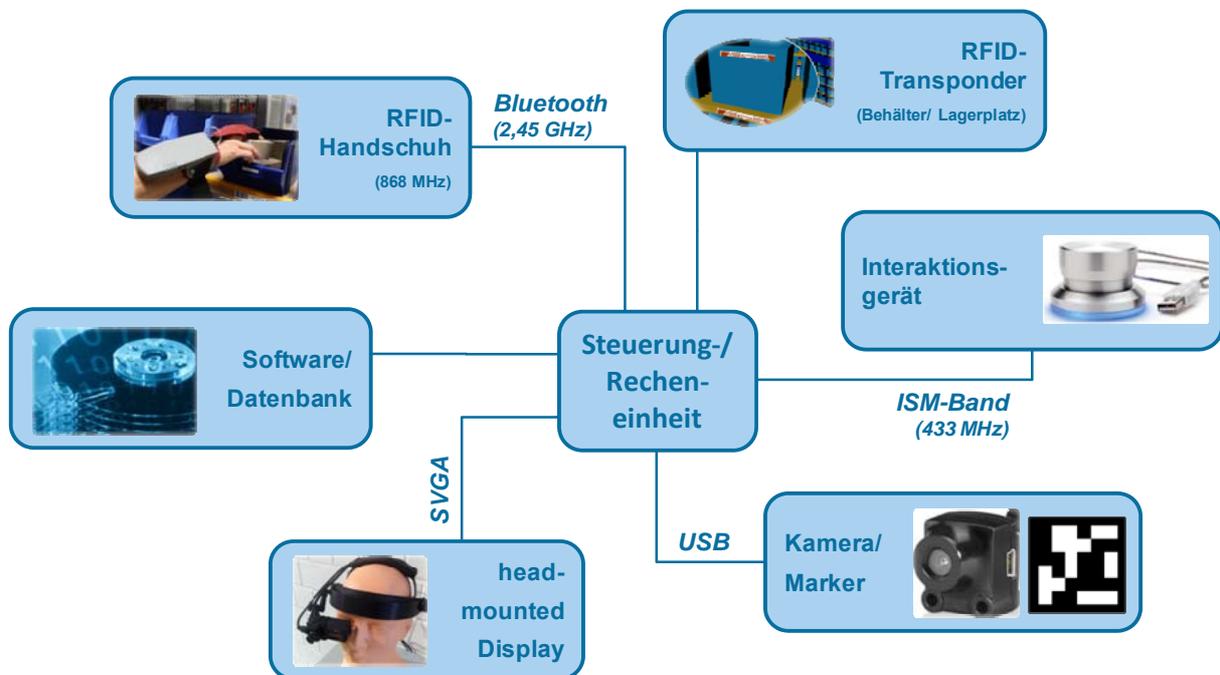


Abbildung 54: Komponenten des Funktionsmusters "Montageunterstützung"

Die Informationsbereitstellung erfolgt über einen UHF-RFID-Transponder am auftragspezifischen Behälter. Über den mobilen RFID-Handschuh werden definierte Speicherbereiche des Transponders ausgelesen und die erhaltenen Informationen über eine Bluetooth-Schnittstelle an die zentrale Steuerungseinheit übertragen. Dort werden die Transponderdaten interpretiert und die relevanten Informationen über das head-mounted Display ausgegeben. Dieses ist über einen SVGA-Anschluss mit der Recheneinheit verbunden. Bei Bedarf kann zudem ein Befehl zur Ausgabe einer akustischen Rückmeldung an den RFID-Handschuh gesendet werden. Dieser signa-

5 Entwicklung der Systemarchitektur und Basisgeräteumgebung

lisiert dem Nutzer bspw. ob der gelesene Transponder verarbeitet oder eine bestimmte Tätigkeit (bspw. in der Kommissionierung) korrekt ausgeführt werden konnte. Im Bereich der Materialbereitstellung an einem KANBAN-Regal direkt am Montagearbeitsplatz wird der Nutzer des Weiteren durch ein Trackingsystem unterstützt. Eine Kamera am HMD sowie mehrere Papiermarker in der Lagerumgebung führen den Mitarbeiter durch die Visualisierung von Pfeile und Rahmen, welche sich in Abhängigkeit der Bewegung des Nutzers an dessen Blickrichtung anpassen, zum korrekten Lagerplatz. Die entsprechenden Informationen sowie virtuellen Objekte werden dabei stets über das HMD direkt in das Sichtfeld des Anwenders eingeblendet.



Abbildung 55: Demonstrator des Funktionsmusters "Montageunterstützung"

Die Komponenten erlauben neben einer kontextbezogenen Informationsbereitstellung zudem die Arbeit mit beiden Händen. Mit Hilfe eines – neben dem RFID-

Handschuh – weiteren Interaktionsgerätes in Form eines Dreh-/ Drückknopfes kann der Nutzer in Kombination mit dem HMD letztlich zusätzliche Informationen zum Montageprozess anfordern. Der Dreh-/ Drückknopf wird dazu am Montagearbeitsplatz montiert sowie über eine Funkverbindung im ISM-Band um 433 MHz mit der zentralen Recheneinheit gekoppelt. Dadurch kann der Nutzer durch das Hilfemenü navigieren und auf Explosionszeichnungen, weiterführende Erläuterungen o. ä. zurückgreifen. Abbildung 55 zeigt den Aufbau des Demonstrators am Lehrstuhl fml.

5.4 Entwicklung eines Systems zur RFID-unterstützten Kommissionierung

Im zweiten Funktionsmuster wird ein System zur Vermeidung von Fehlern in der manuellen Kommissionierung vorgestellt. Das System, welches in Labor- und Praxisumgebung umfangreichen Versuchsreihen unterzogen wird, kann prinzipiell mit verschiedenen Kommissionier- bzw. Informationsbereitstellungssystemen kombiniert werden und berücksichtigt daher lediglich optional die Verwendung eines HMD. Der RFID-Handschuh stellt die Basis des Funktionsmusters dar und dient dabei in erster Linie der Vermeidung von Typ- und Auslassungsfehler. Bevor die Umsetzung des Systems dargestellt wird, werden die Lagerumgebung, die Lagerinhalte sowie die Datenhaltung beleuchtet.

5.4.1 Lagereinrichtung und -inhalt im Funktionsmuster

Für die Umsetzung und Evaluierung des zweiten Funktionsmusters in der „Kommissionierung“ werden zwei voneinander getrennte Lagerumgebungen betrachtet, ein Fachbodenregallager auf Kleinteilebehälterebene sowie ein Gitterboxlager.

Die Entwicklungsarbeiten des Funktionsmusters konzentrierten sich jedoch auf ein Fachbodenregallager mit zwei Gassen, welches im Rahmen des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ am Lehrstuhl fml aufgebaut wurde (vgl. Abbildung 56). Die Abmessungen der Regale umfassen je 3.360 mm in der Länge und 400 mm in der Tiefe. Insgesamt fünf Regalebenen (Fachböden) ergeben eine Höhe von 2.000 mm, wobei die oberste Ebene auf etwa 1,8 m liegt.



Abbildung 56: Lagereinrichtung "Fachbodenregallager"

Die Breite der einzelnen Lagerplätze wird auf eine Behälterbreite von etwa 210 mm angepasst, sodass jede Ebene eines Regals 14 Behälter fasst. In der Summe können dementsprechend 280 Behälter bzw. 280 Objekte in der Größe der betrachteten Behälter eingelagert werden. Die Beschriftung der Lagerplätze erfolgt anhand verschiedener Richtlinien, die bei der Vermeidung von Fehlern beim Ablesen unterstützen (vgl. [Gün-09], [DLA-06], [Vog-97]). Die Gassen, Ebenen und Lagerplätze des Lagers werden danach durch das Abwechseln von Ziffern und Buchstaben kenntlich gemacht. Dementsprechend besteht die Lagerplatzkennzeichnung aus einer Ziffer für die Zeile, einem Buchstaben für die Ebene und wiederum einer Ziffer für den Lagerplatz, sodass eine eindeutige, klar strukturierte und gut ablesbare Beschriftung gewährleistet wird¹⁸. Das Lager wird mit Sichtlagerkästen (Abmessungen 210 x 330 x 140 mm) und Kleinladungsträger (KLT, 600 x 400 x 280 mm) gefüllt, welche

¹⁸ Beispielhafte Bezeichnungen: 1 – A – 01 für das erste bzw. 4 – E – 14 für das letzte Lagerfach.

jeweils mit einem Transponder versehen werden. Die KLT belegen aufgrund ihrer Abmessungen drei Lagerplätze. Die Inhalte der verschiedenen Behälter umfassen kleine und mittlere Schachteln für Normteile wie Schrauben, sowie verschiedene Arzneimittel und weitere Kartonagen unterschiedlicher Größe. Sämtliche Artikel wurden mit einem Etikett inklusive einer Artikelnummer versehen, um innerhalb der späteren Evaluation bei der Entnahme der Artikel die jeweilige Artikelnummer mit der im Auftrag geforderten Artikelnummer vergleichen zu können. Die Artikel wurden chaotisch eingelagert.

Aufgrund der Rahmenbedingungen bei der Evaluation im Praxistest wurde das Funktionsmuster zudem auf eine Kommissionierung aus Gitterboxen angepasst. Die Gitterbox-Kommissionierung ist im Vergleich zu kleineren Behälter durch einen relativ großen Entnahme-Bereich gekennzeichnet. Dadurch ist es erforderlich, mehrere Transponder je Lagerfach anzubringen, wobei in diesem Fall nicht die Behälter (Gitterboxen), sondern der Lagerplatz an sich gekennzeichnet wird. Zu Testzwecken im Rahmen des Forschungsprojektes werden dazu Pendeltransponder eingesetzt, welche von oben in die Gitterbox hinein ragen (vgl. Abbildung 57). Die Gitterboxen in den Praxis-Testreihen waren dabei mit verschiedenen Komponenten unterschiedlicher Größe bestückt, welche i. d. R. ohne definierte Positionen im Behälter gelagert werden.



Abbildung 57: Lagereinrichtung "Gitterboxlager" (nachgestellt)

5.4.2 Umsetzung der RFID-gestützten Kommissionierung

Neben der Unterstützung von Montageprozessen kann das mobile RFID-Lesegerät zur Fehlervermeidung in der Kommissionierung eingesetzt werden. Auch ohne die Integration eines head-mounted Displays können die Grundfunktionalitäten des mobilen RFID-Lesegerätes genutzt werden, um die Entnahme von Artikeln abzusichern ohne den Werker dabei zu beeinträchtigen. Das gewohnte Informationsbereitstellungssystem (Pick-by-Voice, Pick-by-Light, Kommissionierbeleg etc.) wird dabei lediglich um den RFID-Handschuh erweitert. Beim Griff in ein Lagerfach wird ohne zusätzlichen Aufwand für den Mitarbeiter ein dem Artikel zugeordneter Transponder erfasst. Dadurch ist es im Falle eines fehlerhaften Griffes möglich, direkt am Ort der Entnahme eine (akustische) Rückmeldung anzustoßen und somit auf den Fehler hinzuweisen. Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits angedeutet kann die Zuordnung der Transponder zu den Artikeln dabei entweder über den jeweiligen Behälter, aber auch über den entsprechenden Lagerplatz erfolgen. Im Funktionsmuster wird im Bereich des Fachbodenregallagers die Kennzeichnung der Behälter gewählt. Je nach Anwendungsfall könnten jedoch auch in dieser Lagerumgebung Transponder an der Lagerstruktur verwendet werden. Das Prinzip der Fehlervermeidung bei manuellen Tätigkeiten bleibt dasselbe. Abbildung 58 veranschaulicht die beiden Alternativen zu Anbringung der Transponder.

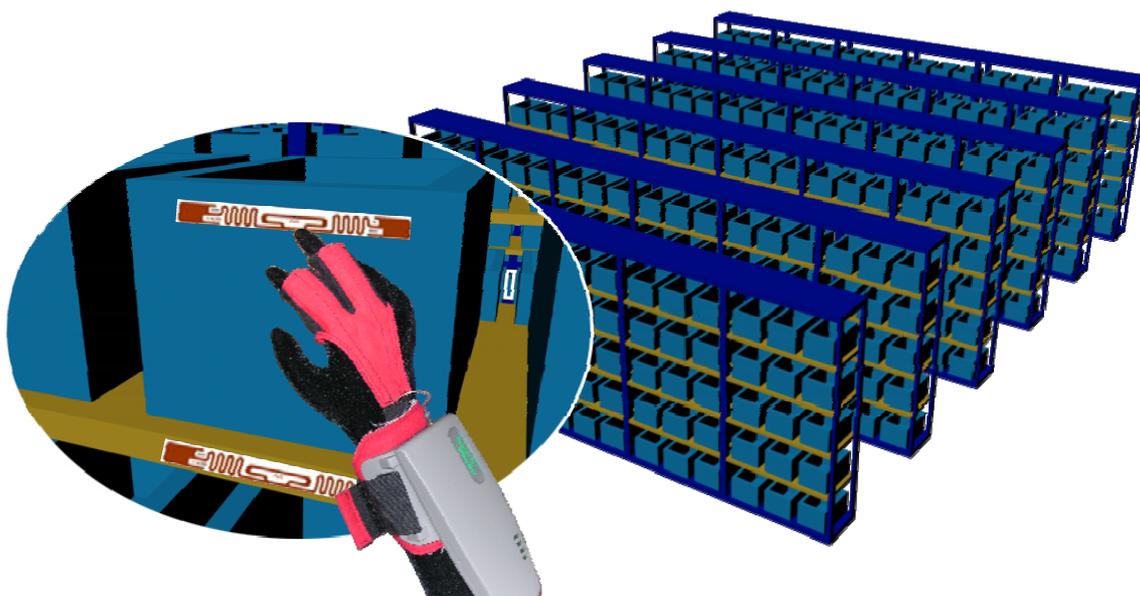


Abbildung 58: Alternative Konzepte zur Anbringung der Transponder im Funktionsmuster „Kommissionierung“

Befinden sich die Behälter in einem offenen Kreislauf hat die Kennzeichnung der Lagerplätze mit Transpondern gegenüber der Behälterkennzeichnung Vorteile, da die Transponder lediglich in einem einmaligen Aufwand bei der Inbetriebnahme des Systems am Lagerplatz angebracht werden müssen. Die laufenden Kosten für die Kennzeichnung von Behältern durch stets neue Transponder sowie den damit verbundenen Aufwand zur immer wiederkehrenden Anbringung derselben würde die Rentabilität des Systems stark beeinträchtigen. Für beide Anbringungskonzepte gilt gleichermaßen, dass die Anpassung und Übertragbarkeit des Systems auf verschiedene Lagertypen (Fachbodenregal, Behälterlager, Gitterboxlager etc.) gewährleistet ist.

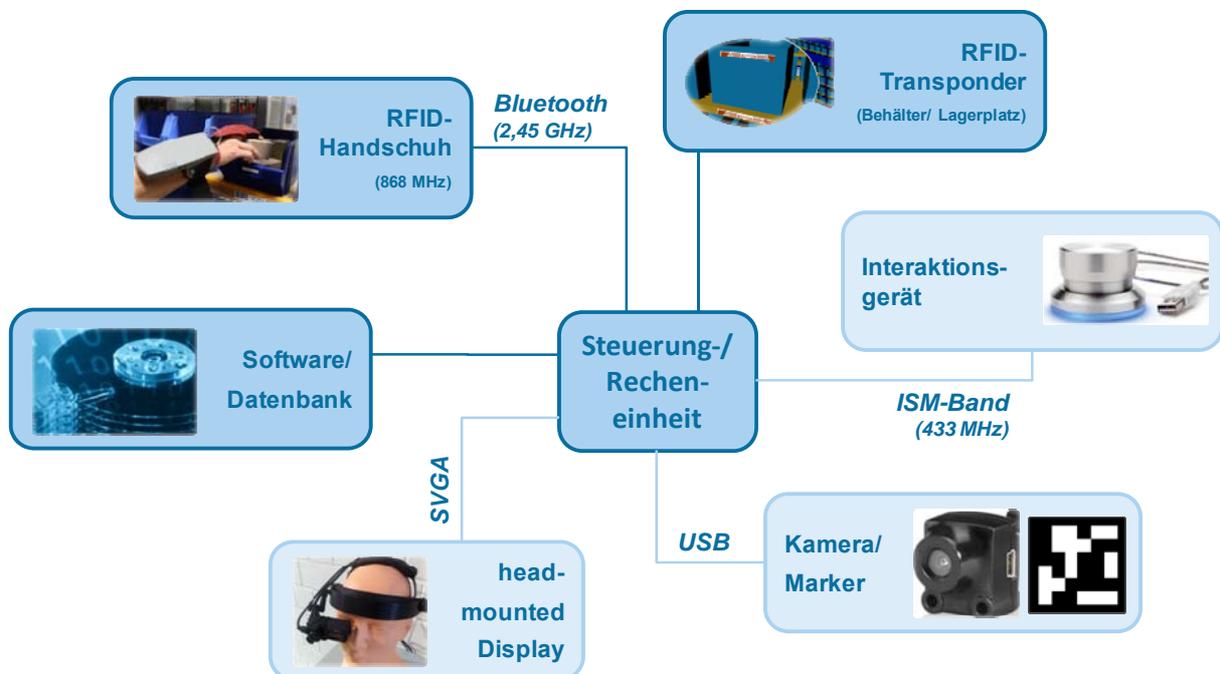


Abbildung 59: Reduzierung der Komponenten im Funktionsmuster "Kommissionierung"

Durch die Verwendung des mobilen RFID-Lesegerätes im Sinne des Wearable Computing als Prüfmechanismus kann der Nutzer auf etwaige Fehler aufmerksam gemacht werden. Die verwendeten Komponenten werden dabei im Vergleich zum Funktionsmuster reduziert. Zwingend erforderlich sind lediglich die Transponder an Behältern oder Lagerplätzen, die Zuordnung der Transponder-ID zum jeweiligen Behälter bzw. Lagerplatz sowie der RFID-Handschuh (vgl. Abbildung 59). Auf das zusätzliche Interaktionsgerät Dreh-/ Drückknopf kann verzichtet werden, da sämtliche Interaktionen mit dem System über den RFID-Handschuh abgebildet werden können. Die Verwendung des Trackingsystem und des HMD ist aufgrund der Kompati-

bilität der RFID-gestützten Kommissionierung zu sämtlichen Informationsbereitstellungssystemen als optional anzusehen. Bei der Evaluation des Funktionsmusters wird auf den Einsatz eines HMD und dementsprechend auch auf den Einsatz eines Trackingsystems verzichtet. Die durchgeführten Testreihen werden jedoch mit bestehenden Versuchsergebnissen zur Kommissionierung mit HMD aus dem bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ verglichen (vgl. Kapitel 6.1). Dabei wurden Testreihen sowohl mit als auch ohne Trackingsystem durchgeführt.

6 Evaluierung der Basisgeräteumgebung in Labor- und Praxistest

Die Evaluation im Rahmen des Forschungsprojektes konzentrierte sich im Wesentlichen auf das Funktionsmuster zur „RFID-unterstützten Kommissionierung“. Im Fokus der Auswertung der Versuchsreihen steht die Analyse der Kommissionierzeit sowie der Kommissionierfehler. Um zudem die Potenziale der AR-Technologie zu berücksichtigen, werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ mit einbezogen. Auf diese Weise können verschiedene Systeme zur Unterstützung des Mitarbeiters in der Kommissionierung aus den Bereichen RFID und Augmented Reality miteinander verglichen werden. Des Weiteren wurde über Interviews und Fragebögen die Bewertung subjektiver Kriterien erfasst. Die Evaluierung des Systems erfolgte sowohl in Labortests als auch in einer mehrwöchigen Versuchsreihe in industrieller Umgebung.

6.1 Evaluation im Labortest

Die Versuchsreihe zur Evaluation im Labortest wurde in der Versuchsumgebung des Lehrstuhls fml (vgl. Kapitel 5.4.1, Abbildung 56) durchgeführt. Die Umsetzung der Versuche sowie die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

6.1.1 Versuchsdurchführung

Das Ziel der Evaluation des Funktionsmusters ist die Untersuchung der Möglichkeiten zur Leistungssteigerung bzw. zur Vermeidung von Fehlern in der manuellen Kommissionierung durch den Einsatz des RFID-Handschuhs. Dazu werden die logistischen Kennzahlen der Kommissionierung im Funktionsmuster mit weiteren Sys-

temen ohne den Einsatz des RFID-Handschuhs verglichen. Durch die Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ können insgesamt vier Systeme einander gegenübergestellt werden, wobei lediglich die beiden ersten Varianten Inhalt der vorliegenden Versuchsreihe sind:

- Kommissionierung mit Papierliste
- Kommissionierung mit Papierliste und RFID-Handschuh
- Kommissionierung mit Pick-by-Vision (ohne Tracking)
- Kommissionierung mit Pick-by-Vision (mit Tracking)

Zur Gewährleistung valider Versuchsergebnisse erfolgte die Testreihe für jede Versuchsperson analog. Der Ablauf des Versuchs startete mit einer Einweisung der Probanden in die Thematik. Dabei wurden neben der Lagereinrichtung der Aufbau der Kommissionierliste sowie die Funktionalität des RFID-Handschuhs erläutert. Die Einweisung endete mit einem Probedurchlauf, wobei ein exemplarischer Auftrag zur Übung im Umgang mit der Papierliste sowie dem RFID-Handschuh diente. Im Anschluss daran startete die eigentliche Durchführung des Versuchs. Jeder Proband absolvierte zwei Versuchsdurchgänge mit Kommissionierliste, einen Durchgang mit und einen ohne den RFID-Handschuh als Unterstützung zur Fehlervermeidung. Jeder einzelne Auftrag wurde in beiden Versuchsdurchgängen anhand des folgenden Ablaufs bearbeitet:

- Auftrag in Form einer Papierliste am „Übergabe-Ort“ aufnehmen
- Sammelbehälter am „Übergabe-Ort“ aufnehmen
- Sammelbehälter auf dem Kommissionierwagen abstellen
- Einzelne Positionen des Auftrags kommissionieren, den Kommissionierwagen dabei mit durch die Gassen führen
- Kommissionierten Auftrag abzeichnen
- Abgezeichneten Auftrag in den Sammelbehälter geben
- Sammelbehälter am „Übergabe-Ort“ abstellen

Zur Berücksichtigung möglicher Lerneffekte wurde die Reihenfolge, in welcher die Probanden die beiden Kommissionier-Techniken durchführten, randomisiert. Die Hälfte der Probanden startete demnach mit dem RFID-Handschuh während die andere Hälfte zunächst ohne technische Hilfsmittel arbeitete. Der Aufbau der Aufträge

für die beiden Versuchsdurchläufe wurde dabei analog gestaltet. Zwar wurden unterschiedliche Artikel kommissioniert, die Aufträge waren jedoch hinsichtlich der Anzahl an Positionen sowie der jeweils zu entnehmenden Menge identisch. Zudem verhielten sich die Wege zu den Artikeln sowie die Greifvorgänge konstant. Für beide Varianten wurden insgesamt sechs Aufträge mit durchschnittlich 5,0 Positionen und 2,03 Entnahmeeinheiten/ Position kommissioniert. Tabelle 9 fasst die Auftragsstruktur zusammen.

Auftrag	Positionen	Entnahmeeinheiten
A1	3	5
A2	6	9
A3	9	18
A4	3	4
A5	6	12
A6	3	13
SUMME	30	61

Tabelle 9: Auftragsstruktur bei der Evaluation im Labortest

Um die Versuchsreihen mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ und damit einer Augmented-Reality-unterstützten Kommissionierung vergleichen zu können, wurden die Aufträge für die beiden Versuchsdurchläufe an die Evaluation der Funktionsmuster im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ angepasst. Insgesamt nahmen an der Evaluation 20 Probanden teil, wobei sowohl Akademiker und Studenten als auch Facharbeiter unter ihnen waren. Weitere Informationen zur Probandenstruktur können Tabelle 10 entnommen werden.

Anzahl der Probanden	20		
Geschlecht	1 Frau		19 Männer
Durchschnittliches Alter	23,3		
Alterspanne	14		33
Beruf	8 Facharbeiter	4 Studenten	8 Akademiker
Kommissioniererfahrung	9 Probanden		
Lagerfüllungsgrad	91%		

Tabelle 10: Probandenstruktur bei der Evaluation im Labortest

Nach jedem der beiden Durchläufe beantworteten die Probanden zudem einen Fragebogen zur Ermittlung der subjektiven Beurteilung des zuvor durchgeführten Versuchs (vgl. Anhang E).

6.1.2 Versuchsergebnisse

Bei der Auswertung der Versuchsreihen werden zunächst die Kommissionierfehler mit den jeweiligen Fehlerarten (Auswertung der kommissionierten Artikel je Auftrag und Proband) sowie die Kommissionierzeit (Zeit je Auftrag und Proband) untersucht. Beide Kriterien werden zudem hinsichtlich der Lerneffekte infolge des Randomisierens analysiert. Zuletzt werden die anhand der Fragebögen erfassten subjektiven Beurteilungen untersucht.

Für die Kommissionierzeiten mit und ohne RFID-Handschuh kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (vgl. Abbildung 60, links). Ohne die technische Unterstützung durch den RFID-Handschuh liegt die durchschnittliche Zeit über alle Probanden bei 12,54 min, für die Verwendung des RFID-Handschuhs bei 12,35 min. Die Standardabweichung für die Kommissionierung ohne RFID-Handschuh liegt bei 2,88, für die Variante mit RFID-Handschuh bei 2,14.

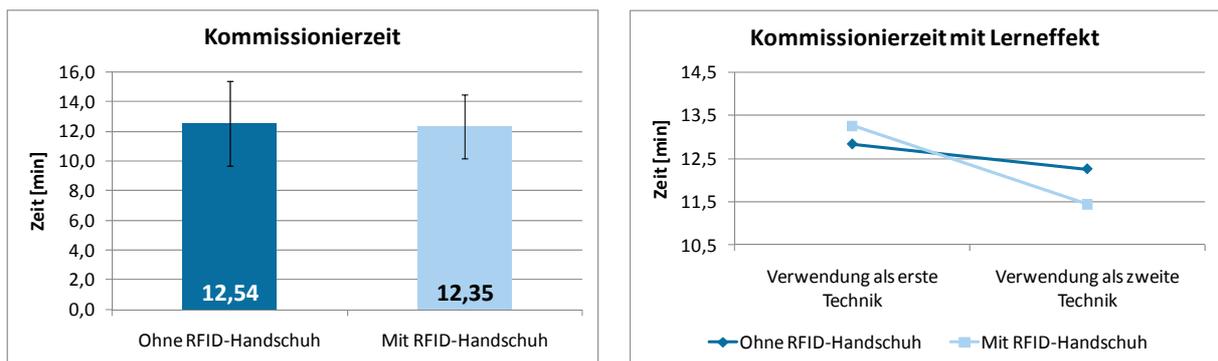


Abbildung 60: Kommissionierzeit und Kommissionierzeit mit Lerneffekt

Zur Reduzierung und Analyse der Lerneffekte wurde die Reihenfolge der beiden Versuchsdurchläufe randomisiert. Jeweils zehn Probanden starteten mit und ohne RFID-Handschuh. Auch die Differenz der Kommissionierzeiten unter Berücksichtigung der Reihenfolge ist nicht signifikant. Um eine statistische Signifikanz nachweisen zu können, absolvierten zu wenige Probanden die Versuchsreihe. Unter Berücksichtigung der Lerneffekte ist jedoch eine deutliche Tendenz zur Reduzierung der Kommissionierzeit mit dem RFID-Handschuh zu erkennen (vgl. Abbildung 60, rechts). Für die zu Beginn verwendete Kommissionier-Variante ist die durchschnittliche Zeit für die Kommissionierung ohne RFID-Handschuh geringer (12,83 min im Vergleich zu 13,26 min mit RFID-Handschuh). Sind im zweiten Versuchsdurchlauf

der Aufbau des Lagers sowie die Lagereinrichtung bereits bekannt, wird mit dem RFID-Handschuh jedoch schneller (11,45 min) kommissioniert als ohne RFID-Handschuh (12,25 min). Gerade bei Routinetätigkeiten sowie fallender Motivation kann somit durch die Verwendung des RFID-basierten Prüfmechanismus die benötigte Zeit zur Kommissionierung reduziert werden. Die Ergebnisse sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass sich die Probanden bei Kenntnis der Lagerumgebung und des Arbeitsablaufes verstärkt auf das Feedback des RFID-Handschuhs konzentrieren können. Ein weiterer Grund liegt jedoch sicherlich auch in der Steigerung bezüglich des Vertrauens in die eigene Tätigkeit.

Durch den Wegfall einer manuellen Quittierung kann mit dem RFID-Handschuh zusätzlich Zeit eingespart werden. Dies wurde im Labortest nicht berücksichtigt. Die Probanden mussten – der Übersicht im Arbeitsablauf geschuldet – auch mit dem RFID-Handschuh jede Entnahme mit einem Vermerk auf der Papierliste quittieren.

Bei der Auswertung der Fehler zeigt sich das wesentliche Potenzial des untersuchten Funktionsmusters. Obgleich aufgrund zu weniger Fehler und Probanden auch für die Kommissionierfehler keine signifikanten Unterschiede festzustellen sind, kann eine Vermeidung von Fehlern bei der Auftragsbearbeitung mit dem RFID-Handschuh abgeleitet werden (vgl. Abbildung 61, links). Mit dem RFID-Handschuh werden lediglich 0,63 % der Positionen fehlerhaft kommissioniert, wobei die Fehlerquote ohne die Verwendung des technischen Hilfsmittels bei 1,67 % liegt. Hinsichtlich der Lerneffekte zeichnen sich keine nennenswerten Unterschiede ab. Bei beiden Varianten reduzierten sich die Kommissionierfehler, wenn die jeweilige Variante als zweite verwendet wurde (vgl. Abbildung 61, rechts).

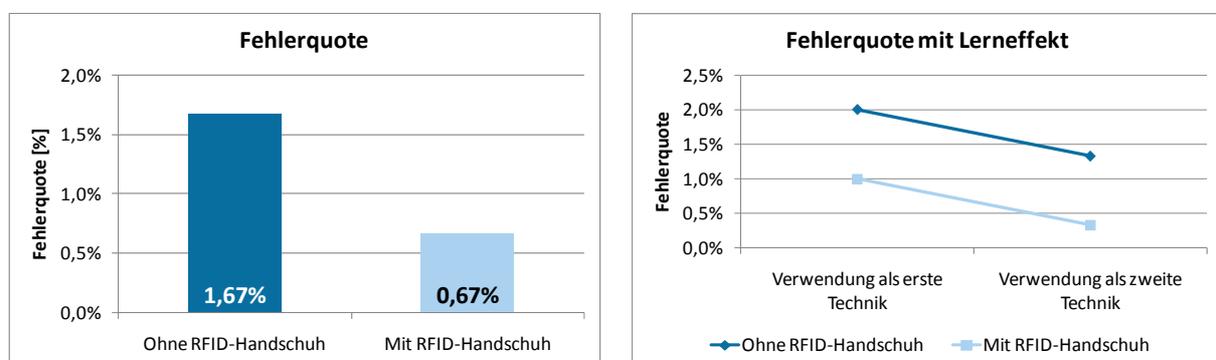


Abbildung 61: Kommissionierfehlerquote und Fehlerquote mit Lerneffekt

Die Auswertung der Fehler hinsichtlich der Fehlerart (vgl. Abbildung 62) unterstreicht das größte Potenzial des untersuchten Funktionsmusters. Bei der Kommissionierung mit RFID-Handschuh werden mit Ausnahme eines Fehlers, welcher eine Ausnahme darstellt und auf eine Schwachstelle in der Software-Logik zurückzuführen ist, keine Typfehler begangen. Der entsprechende Artikel musste in der Menge 3 kommissioniert werden. In einem ersten Schritt wurden zwei Stück des korrekten Artikels entnommen, was durch die positive Rückmeldung des RFID-Handschuhs bestätigt wurde. Die positive Rückmeldung wird jedoch nur einfach ausgegeben, sodass der Proband bei der Entnahme des dritten Artikels keine Rückmeldung erwartete und „ungehindert“ in das falsche Lagerfach greifen konnte. Daraus resultierte nach Definition ein Typfehler, welcher jedoch durch eine Anpassung der Software-Logik hätte vermieden werden können.

Im Allgemeinen verhindert die akustische Rückmeldung während des Griffes in das Lagerfach, dass der Mitarbeiter Artikel aus dem falschen Behälter bzw. dem falschen Lagerplatz entnimmt (Typfehler) sowie eine gesamte Position im Auftrag nicht bearbeitet (Auslassungsfehler). Es gilt jedoch ebenfalls zu erwähnen, dass Mengenfehler mit dem untersuchten System nicht vermieden werden können.

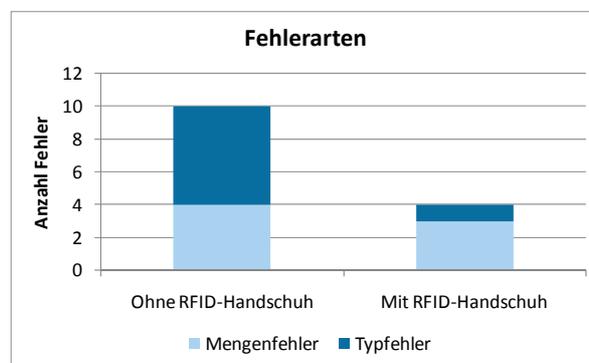


Abbildung 62: Fehlerarten

Abbildung 63 gibt letztlich einen Überblick über den Zusammenhang zwischen den begangenen Fehlern und der benötigten Zeit je Proband und Variante (mit/ ohne RFID-Handschuh) bzw. je Proband. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass prinzipiell keine eindeutigen Abhängigkeiten zwischen der benötigten Zeit und den begangenen Fehlern abgeleitet werden können. Auch wenn ein Proband mehr Zeit für die Kommissionierung benötigt, werden nicht mehr oder wenige Fehler begangen. Aus der linken Abbildung könnte eine Tendenz zur Steigerung der Fehleranzahl

mit steigender Kommissionierzeit abgeleitet werden, die rechte Abbildung widerspricht dieser Aussage jedoch. Werden die Fehler aus beiden Versuchsdurchläufen addiert und der summierten Kommissionierzeit gegenüber gestellt, geht die Tendenz mit Ausnahme eines Probanden eher dahin, dass die Fehlerquote steigt je schneller die Aufträge kommissioniert werden.

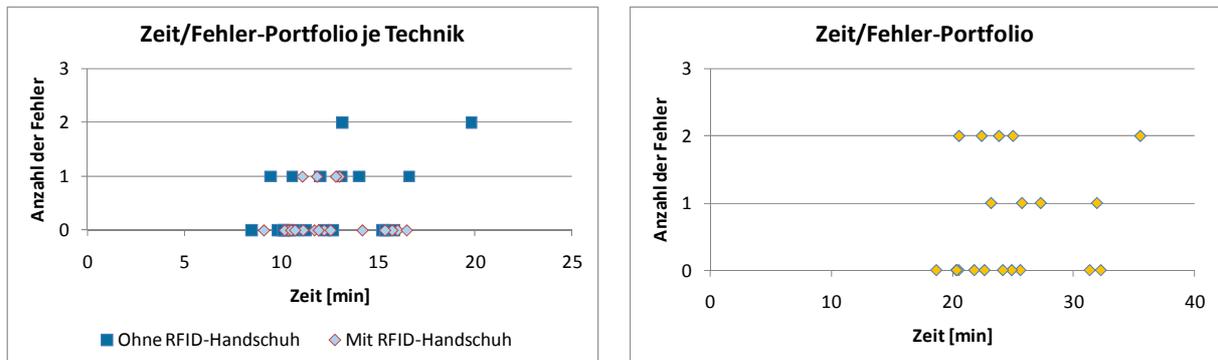


Abbildung 63: Zeit-/Fehler-Portfolio je Proband und Variante (li.) bzw. je Proband (re.)

Beim Vergleich der Evaluationsergebnisse mit den Resultaten im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ (vgl. Abbildung 64) fällt auf, dass trotz identischer Auftragsstruktur und analoger Versuchsdurchführung Unterschiede für die Kommissionierzeiten und Fehlerquoten bei der Variante ohne technische Hilfsmittel zu erkennen sind. Während die Kommissionierung der sechs Aufträge mit durchschnittlich 5,0 Positionen je Auftrag und 2,03 Entnahmeeinheiten je Position im Forschungsprojekt „Pick-by-Vision“ durchschnittlich 13,86 min benötigte, liegt der äquivalente Wert für die vorliegende Arbeit bei 12,54 min. Analog lassen sich Unterschiede bei der Fehlerquote erkennen. Im Projekt „Pick-by-Vision“ liegt die Quote bei 1,40 %, in der vorliegenden Arbeit bei 1,67 %. Die Gründe für die beschriebenen Unterschiede werden in der unterschiedlichen Probandenstruktur vermutet.

Um die Ergebnisse beider Evaluationen nun vergleichen zu können, werden die Ergebnisse für die Versuche mit technischer Unterstützung jeweils auf die Basis – die Kommissionierung mit Papierliste ohne technische Hilfsmittel – bezogen. Tabelle 11 fasst dementsprechend die Potenziale der untersuchten Funktionsmuster hinsichtlich der prozentualen Reduzierung von Kommissionierzeit und -fehler zusammen. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass „Pick-by-Vision“ hinsichtlich der Reduzierung der erforderlichen Kommissionierzeit Vorteile gegenüber der RFID-unterstützten Kommissionierung aufweist. Sowohl ohne (8,73 %) als auch mit Trackingsystem

(10,46 %) kann die Kommissionierzeit stärker reduziert werden als im Funktionsmuster der vorliegenden Arbeit (1,52 %). Dies war jedoch zu erwarten, da sich die RFID-unterstützte Kommissionierung lediglich um den Prüfmechanismus von der herkömmlichen Kommissionierung mit Papierliste unterscheidet. Die Informationsaufnahme erfolgt in beiden Fällen analog, sodass sich die erforderliche Zeit lediglich bei der Entnahme bzw. der anschließenden Kontrolle des Greifvorgangs reduzieren lässt.

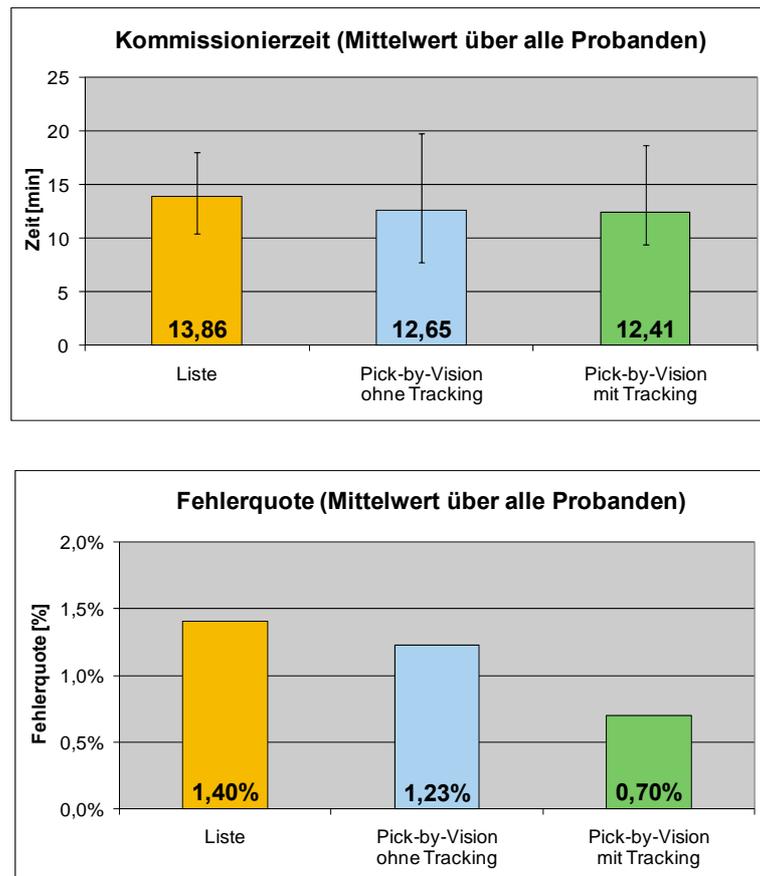


Abbildung 64: Kommissionierzeit und -fehler im System „Pick-by-Vision“ [Gün-09]

Bei der Analyse der Fehlerquote ergibt sich jedoch ein verändertes Bild. Durch den Einsatz des RFID-Handschuhs ergeben sich für die Evaluation im Labortest eine Reduzierung der Fehler um 59,88 % und damit ein höherer Wert als bei der Verwendung der Augmented-Reality-Technologie im „Pick-by-Vision“-System. Dabei konnte mit einem Infrarot-Trackingsystem eine Verringerung der Fehler um 50 % nachgewiesen werden.

	Kommissionierzeit [min]	Kommissionierfehlerquote
Basis (Papierliste) - Pick-by-Vision -	13,86	1,40%
Basis (Papierliste) - Papierlose Produktion -	12,54	1,67%
Reduzierung durch Pick-by-Vision ohne Tracking	8,73%	12,14%
Reduzierung durch Pick-by-Vision mit Tracking	10,46%	50,00%
Reduzierung durch RFID-unterstützte Komm.	1,52%	59,88%

Tabelle 11: Vergleich der Potenziale der Funktionsmuster aus den Projekten "Pick-by-Vision" und "Papierlose Produktion und Logistik"

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der RFID-Handschuh in der getesteten Version zwar nicht zur Reduzierung der Kommissionierzeit beiträgt, jedoch erhebliches Potenzial hinsichtlich der Vermeidung von Typ- und Auslassungsfehlern aufweist.

Neben den logistischen Kennzahlen Kommissionierzeit und -fehler wurde mit Hilfe eines Fragebogens die subjektive Beurteilung des untersuchten Funktionsmusters durch die Probanden erfasst. Der Fragebogen zielte dabei auf mehrere Aspekte ab:

- Steigert der RFID-Handschuh die Motivation für die Tätigkeit?
- Erhöht der RFID-Handschuh am Handgelenk die Belastung?
- Wie wirkt das System auf die Probanden?
- Arbeiten die Probanden gerne mit dem System?
- Ist der RFID-Handschuh in der getesteten Version zu groß und/ oder zu schwer?

Zur Bewertung der subjektiven Einschätzung des Systems wurden die einzelnen Kriterien (Motivation, Belastung, Wirkung des Systems, Benutzerfreundlichkeit, Größe, Gewicht) jeweils mit mehreren Fragestellungen (zwischen drei und fünf) untersucht. Um mögliche individuelle Wertungen der Formulierungen ausschließen zu können, wurden die Fragen stets positiv und negativ verfasst. Sämtlichen Fragestellungen wurde eine Antwort-Skala in sechs Stufen zugrunde gelegt. Dadurch mussten sich die Probanden im Zweifelsfall für eine eher positive oder eher negative Be-

wertung entscheiden. Für die Auswertung der Beurteilungen wurde jeweils der Durchschnitt aus den 20 Bewertungen gebildet.

Die Bewertung der Motivation für die Aufgabe der Kommissionierung und der Belastung durch die Tätigkeit erfolgte für beide Versuchsdurchläufe. Dadurch konnte ermittelt werden, inwiefern sich die Kriterien zwischen der herkömmlichen Kommissionierung und der RFID-gestützten Kommissionierung unterscheiden. Beide Kriterien werden aus Sicht des RFID-Handschuhs positiv bewertet (vgl. Abbildung 65). Mit technischer Unterstützung durch das RFID-System steigt die Motivation für die Aufgabe (2,60 → 4,28), die Belastung durch die Tätigkeit wird niedriger bewertet (2,45 → 1,88). Die Standardabweichungen verhalten sich jeweils ähnlich für beide Varianten.

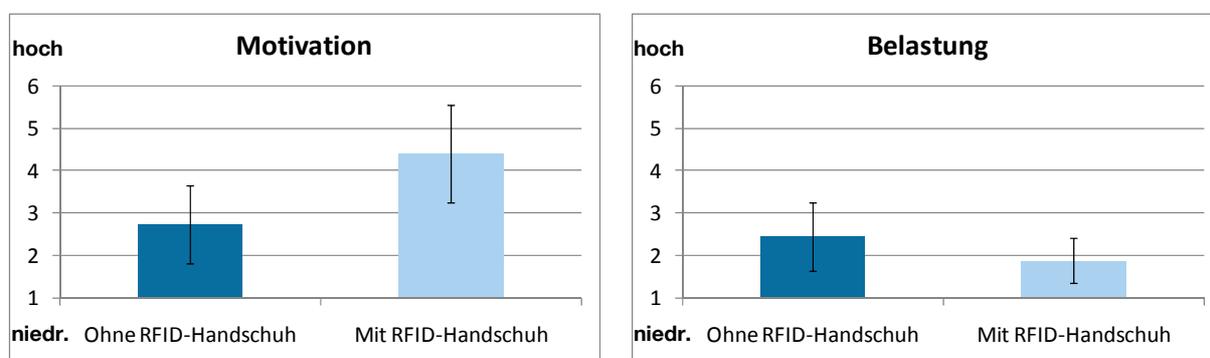


Abbildung 65: Motivation und Belastung (inkl. Standardabweichung)

Neben der Motivation und der Belastung wurden für den Versuchsdurchlauf mit RFID-Handschuh exklusiv die Kriterien Wirkung des Systems, Benutzerfreundlichkeit, Größe und Gewicht bewertet (vgl. Abbildung 66). Die Bewertung der Wirkung des Systems liegt mit einem Wert von 3,07 zwar unter dem Schwellenwert von 3,5, ist aufgrund der technikaffinen Probandenstruktur als ein kritischer Wert einzuschätzen. Die eher negative Bewertung ist vor allem auf eine teils verspätete Reaktion des RFID-Handschuhs bzgl. der akustischen Rückmeldung zurückzuführen. Abhilfe könnte hierbei eine Optimierung der Funkübertragung sowie eine Personalisierung des RFID-Handschuhs schaffen. Letzteres könnte bspw. die Geschwindigkeit des Greifvorgang, welche zwischen den einzelnen Probanden variiert, sowie die individuellen Einflüsse der menschlichen Hand bzw. Finger auf die Antenne des RFID-Handschuhs berücksichtigen.

Hinsichtlich der Größe und des Gewichts des Handschuhs können grundsätzliche ähnliche Aussagen getroffen werden wie bei der Wirkung des Systems. Während die Größe des RFID-Handschuhs weniger kritisch eingeschätzt wird (2,55), liegt der Wert für das Gewicht des Gerätes mit 3,67 über dem Schwellenwert. Die Größe des RFID-Handschuhs wird v. a. beim Griff in das Lagerfach häufig als störend empfunden. Das Gewicht von 340 g ist für einen 8h-Einsatz in industrieller Umgebung zu schwer und wird dementsprechend negativ bewertet. Die Benutzerfreundlichkeit, welche hinsichtlich der Intuitivität der Bedienung und der Unterstützung der Tätigkeit zu bewerten war, weist mit einem Wert von 1,45 einen hervorragenden auf.

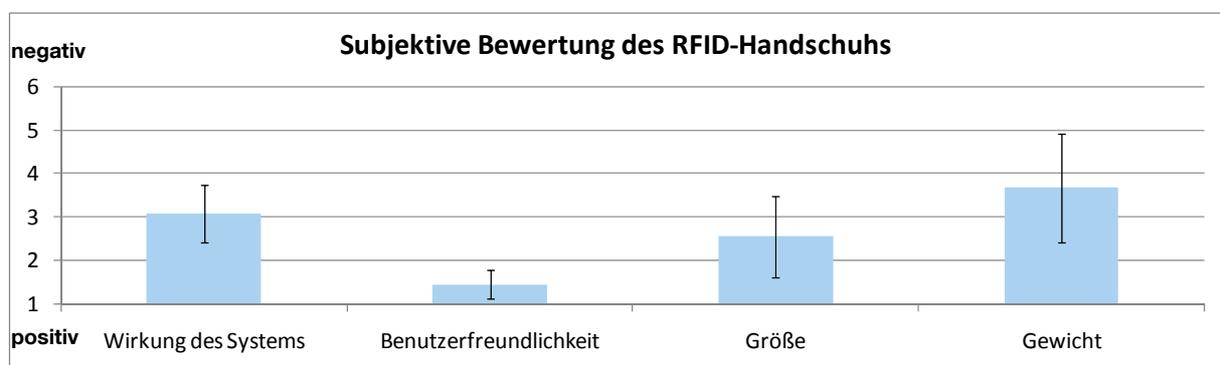


Abbildung 66: Subjektive Bewertung des RFID-Handschuhs

Im abschließenden Teil des Fragebogens wurde zum einen die individuelle Einschätzung des Potenzials des Funktionsmusters erfragt und zum anderen verschiedene Systemalternativen zur vergleichenden Bewertung angeboten (vgl. Abbildung 67). Die Auswertung der Fragebögen ergibt hier bspw. das Ergebnis, dass knapp 70 % der Probanden einen Praxiseinsatz des Systems innerhalb von 5 Jahren als realistisch einschätzen. Hinsichtlich der Verteilung der Komponenten auf Handgelenk und Körper, was in erster Linie auf die Reduzierung des Gewichts am Handgelenk abzielt, hatten die Versuchspersonen unterschiedliche Meinungen. Etwa die Hälfte der Probanden würde hier eine Verteilung der Komponenten auf Handgelenk und Körper bevorzugen, während die andere Hälfte keine Komponenten am Körper tragen möchte, wodurch bspw. eine Kabelführung in der Kleidung erforderlich wird. Die akustische Rückmeldung wird von 65 % der Befragten der optischen Rückmeldung vorgezogen. Ein unerwartet hoher Anteil (ca. 31 %) würde zudem die Informationsbereitstellung über die Papierliste einem Display am RFID-Handschuh vorziehen.

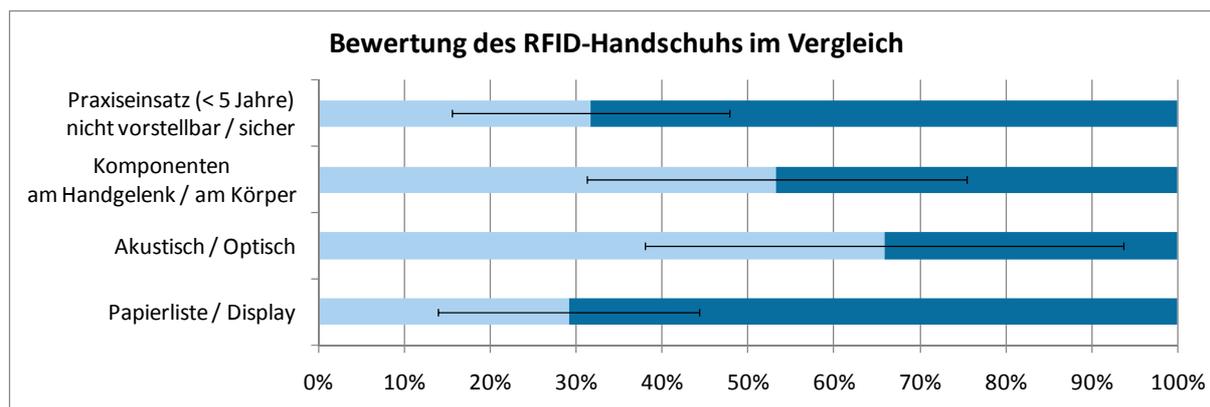


Abbildung 67: Bewertung des RFID-Handschuhs im Vergleich

Im Allgemeinen gilt es jedoch darauf hinzuweisen, dass die Standardabweichungen für nahezu alle der vier Fragestellung sehr hoch ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Meinungen der einzelnen Probanden stark auseinandergehen. Eine weitere Verwertung der Ergebnisse gilt es daher bei Bedarf zu prüfen.

6.2 Evaluation im Praxistest

Neben den Untersuchungen in der Versuchsumgebung des Lehrstuhls fml wurde das Funktionsmuster in zwei aufeinander aufbauen Testreihen über einen Zeitraum von fünf Wochen¹⁹ in industrieller Umgebung evaluiert. Aufgrund einiger Systemanpassungen nach der ersten Testphase werden im Folgenden ausschließlich die Ergebnisse der zweiten Testphase vorgestellt.

6.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte neben den Untersuchungen im Labor-test eine Evaluation des Funktionsmusters um den RFID-Handschuh bei einem Logistikdienstleister der Automobilindustrie. Bei der sequenzgerechten Kommissionierung innerhalb eines Gitterboxregallagers mit etwa 25 Stellplätzen wurden mehrere Facharbeiter als Probanden für den Systemtest eingesetzt. Zur Gewährleistung eines reibungslosen Ablaufs wurde an der gewohnten Informationsbereitstellung über Papierbelege festgehalten. Zudem erfolgte eine Anbindung an unternehmenseigene Datenbank, um die Auftragsdaten nicht nur zum Druck der Papierbelege, sondern

¹⁹ Dauer der Testphasen – Testphase 1: 10 Tage, Testphase 2: 14 Tage

ebenfalls zur Steuerung der RFID-unterstützten Kommissionierung nutzen zu können. Das Kommissioniersystem sieht im Prozess keine Wegoptimierung innerhalb der Aufträge vor, da aufgrund der Sequenzierung die Abgabe jedes einzelnen Artikels nach jeder Entnahme vorgeschrieben wird (vgl. Abbildung 68, links). Je Lagerfach wurden drei Transponder eingesetzt. Dies diente zum einen der Sicherstellung eines erfolgreichen Lesevorgangs unabhängig davon, wie bzw. von welcher Seite der Mitarbeiter in die Gitterbox greift, und zum anderen der Analyse des Greifmusters. Mit der Untersuchung können u. U. Aussagen für weitere Entwicklungen des Transponder-Anbringungskonzeptes getroffen werden. Die Testreihe startete mit einer Einweisung der Mitarbeiter sowie der verantwortlichen Schichtleiter. Der Einweisung, welche etwa 15 Minuten andauerte, schloss sich eine etwa zweistündige Begleitung der Mitarbeiter durch den Prozess an. Im Anschluss daran kommissionierten die Probanden über 3 Wochen selbstständig und ohne zusätzliche Anweisungen der Forschungsstelle. Dabei sei angemerkt, dass die ausgewählte Lagergasse einen eigenständigen Bereich darstellt, in dem die Kommissionierer etwa die Hälfte der Arbeitszeit verbringen. Dadurch konnte der RFID-Handschuh in den Phasen, in welchen in anderen Gassen kommissioniert wurde, jeweils abgelegt und wieder aufgeladen werden. Durch Interviews mit den Kommissionierern nach der dreiwöchigen Testphase konnten die subjektiven Empfindungen bzgl. des Systems erfasst werden. Zudem waren die Mitarbeiter angehalten, während der Testlaufzeit mögliche Anmerkungen zu notieren.



Abbildung 68: Lagerumgebung im Praxistest (schematisch)

Der Kommissioniervorgang sowie der Umgang mit dem RFID-Handschuh wurden in Form einer Arbeitsanweisung festgehalten. Diese wurde in der betroffenen Gasse ausgelegt und gab den Kommissionierern im Zweifelsfall eine Hilfestellung im Prozessablauf mit dem RFID-Handschuh.

6.2.2 Versuchsergebnisse

Die Auswertung der Versuchsergebnisse aus den Praxistests fokussiert eine im Vergleich zum Labortest etwas veränderte Zielstellung. Analog zu den Labortests werden auch für die industriellen Untersuchungen mögliche Veränderungen der Fehlerquote analysiert, wobei die Fehlerzahlen für die herkömmliche Kommissionierung bekannt sind.

Im Unterscheid zur Evaluierung im Labor konnten im Praxistest jedoch keine Aussagen zur Kommissionierzeit getroffen werden. Da die ausgewählte Lagergasse lediglich einen Teil der Kommissionierung einnimmt und die Aufträge in der entsprechenden Gasse nicht in regelmäßigen Intervallen bearbeitet werden, kann die Bearbeitungszeit nur geschätzt werden. Zudem hätte eine genaue Auswertung der benötigten Zeit in der Testreihe eine Beobachtung des Praxistests zur Folge gehabt. Dies hätte u. U. Auswirkungen auf das Verhalten der Mitarbeiter (bewusste Konzentrationssteigerung etc.) und damit auch auf die Fehlerquoten zur Folge gehabt.

Eine zweite Messgröße im Praxistest stellte jedoch die Nutzung des RFID-Handschuhs dar. Eine Prämisse für den Einsatz des Funktionsmusters im laufenden Betrieb war, dass die Kommissionierung wie gewohnt ablaufen und lediglich um den Prüfmechanismus mit dem RFID-Handschuh erweitert wird. Daher war die Verwendung des Funktionsmusters für die Mitarbeiter nicht zwingend erforderlich. Zwar wurde im Rahmen der Einweisung darauf hingewiesen, den Handschuh möglichst häufig zu nutzen, die Kommissionierung wurde jedoch nicht „überwacht“. Die Nutzung des Handschuhs basierte daher auf dem persönlichen Willen der Mitarbeiter, sodass über das Nutzungsverhalten direkt auf die Akzeptanz der Nutzer geschlossen werden kann.

Auf Grundlage von Aufzeichnungen über die durchschnittliche Kommissionierleistung kann eine Abschätzung der SOLL-Picks und dementsprechend der erfolgreichen SOLL-Lesungen durch den RFID-Handschuh getroffen werden. Zudem wurden sämtliche Aktivitäten des Handschuhs im Verlauf der Testreihe mitgeschrieben und im Anschluss ausgewertet. Die Analyse der Logfiles ergibt eine Anzahl erfolgreicher Lesungen (IST) – d. h. eine Anzahl korrekt entnommener Artikel – von 11106 Lesungen. Durch den Vergleich mit dem errechneten SOLL-Wert von 14500 Picks ergibt sich eine Nutzung von 76,7 % (vgl. Tabelle 12). Auf freiwilliger

Basis wurden demnach drei von vier Aufträgen mit dem RFID-Handschuh durchgeführt; unter Berücksichtigung des Zeitdrucks²⁰ der Mitarbeiter sowie des prototypenhaften Status des Handschuhs ein äußerst akzeptabler Wert.

Anzahl erfolgreicher Lesungen (IST)	11106
Anzahl erfolgreicher Lesungen (SOLL)	14500
Nutzung	76,6%
<hr/>	
<i>Anzahl der Lesungen (IST)</i>	<i>14750</i>

Tabelle 12: Übersicht über Identifikationsvorgänge im Praxistest

Aus Tabelle 12 wird zudem ersichtlich, dass die Anzahl aller Lesungen einem Wert von 14750 entspricht. Die Differenz zur Anzahl erfolgreicher IST-Lesungen von insgesamt 3644 Lesungen entspricht dementsprechend der Anzahl negativer Rückmeldungen des Handschuhs. Diese hatten – neben der Warnung vor einem möglichen Kommissionierfehler – verschiedene Ursachen. Mögliche Fehler im Umgang mit dem RFID-Handschuh werden im Folgenden zusammengefasst:

- Wiederhol-Lesungen: Der Mitarbeiter bleibt länger als die erwartete und kalkulierte Zeit im Lagerfach bzw. in der Nähe des Transponders. Die Auswirkung ist ein Fehler-Signal, da das System bereits den nächsten Artikel erwartet.
- Ungewollte Lesungen bei der Unterbrechung der Kommissionierung (Bereinigungsarbeiten, administrative Tätigkeiten etc.): Die Reichweite des RFID-Handschuhs kann zu Lesungen von Transpondern führen, wenn der Mitarbeiter bspw. in der Lagergasse neu angelieferte Artikel handhabt oder kurz in der Gasse verweilt, um auf der Kommissionierliste die Entnahme der Artikel zu notieren. Dies hat ein negatives Feedback zur Folge, welches nicht im Zusammenhang mit der eigentlichen Tätigkeit steht.
- Lesungen beim Vorbeigehen: Beim Gang durch die Lagergassen werden aufgrund des kontinuierlichen Lesevorgangs stets Transponder erfasst. Befindet

²⁰ Zur Verwendung des RFID-Handschuhs musste dieser jeweils vor Beginn eines Kommissionierauftrags angelegt werden und einige Sekunden auf die Bluetooth-Verbindung gewartet werden. Zudem musste die Synchronisation des Papierbelegs mit der Software an einem Monitor in der Nähe des Druckers überprüft werden.

sich der RFID-Handschuh in diesem Fall länger als kalkuliert und ausreichend nahe an einem einzelnen Transponder, wird ein Fehler-Signal ausgelöst.

Für einen serienreifen Einsatz in industrieller Umgebung gilt es, die beschriebenen Unzulänglichkeiten im Umgang mit dem RFID-Handschuh drastisch zu reduzieren. Häufige Warn-Signale, die offensichtlich nicht in Zusammenhang mit dem eigentlichen Prozessablauf stehen, gefährden nicht nur die Nutzerakzeptanz, sondern ebenso die Glaubwürdigkeit des Systems.

Weiterer Optimierungsbedarf besteht hinsichtlich der Anbringung der Transponder am Lagerplatz. In der Testreihe wurde der relativ große Bereich für den Greifvorgang mit drei Transponder abgedeckt, welche von oben in die Gitterbox ragen. Über die Analyse der beim Greifvorgang erfassten Transponder sollten Rückschlüsse auf das Greifmuster und dadurch auf eine mögliche Weiterentwicklung der Anzahl an Transpondern sowie der jeweiligen Positionen für die Kommissionierung aus Gitterboxen getroffen werden. Abbildung 69 fasst die Auswertung der Ergebnisse zusammen.

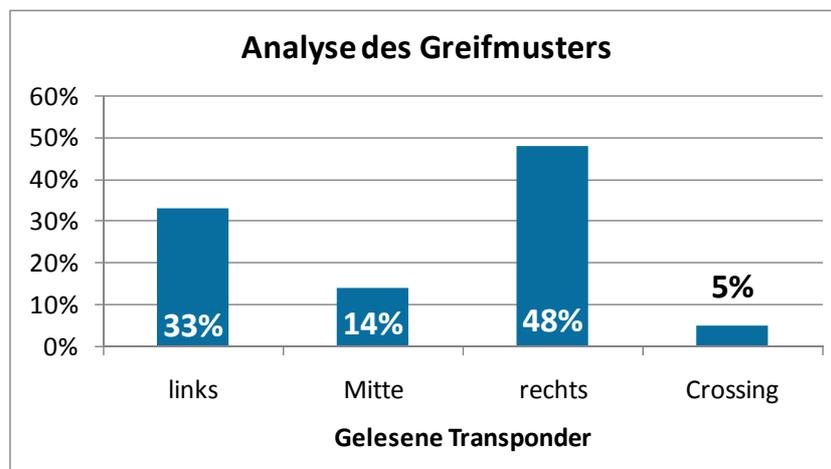


Abbildung 69: Analyse des Greifmusters im Praxistest

Der Maximalwert von 48 % für den jeweils rechten Transponder war zu erwarten, da die Mitarbeiter überwiegend Rechtshänder sind. Dadurch dass die Mitarbeiter jedoch häufig von links auf die Lagerplätze zugehen und auf direktem Weg in die Gitterbox greifen, wird bei 33 % der Greifvorgänge auch der linke Transponder gelesen. Der mittlere Transponder weist einen Wert von 14 % auf, sodass keine eindeutige Aussage über die Notwendigkeit jedes einzelnen Transponders getroffen werden kann. Die restlichen 5 % („Crossing“) stellen softwarebasierte Simulationen des Greifvorgangs über eine Taste am Rechner in der Lagergasse dar. Dadurch konnten

die Mitarbeiter im Notfall jeweils eine Position im Auftrag bzw. die Erfassung jeweils eines Lagerplatz-Transponders überspringen.

Die bedeutendste Auswertung innerhalb der Praxistests stellt jedoch die Analyse der Fehlerquote dar. Die Basis der Untersuchung sind die vorhandenen Daten zum bestehenden System, einer papierbasierten Kommissionierliste. Danach werden aktuell 13,8 Auslassungsfehler sowie 22,5 Typfehler pro Monat begangen (vgl. Tabelle 13). Mengenfehler stellen im untersuchten Einsatzfall kein Problem dar, da die Sequenzierung der Artikel durch die Losgröße 1 gekennzeichnet ist.

	Fehler ohne RFID-Handschuh	Fehler mit RFID-Handschuh	Reduzierung der Fehler mit RFID-Handschuh
Auslassungsfehler	13,8 pro Monat	2,5 pro Monat	81,9%
Typfehler	22,5 pro Monat	15,5 pro Monat	31,1%
Gesamt	36,3 pro Monat	18 pro Monat	50,3%

Tabelle 13: Reduzierung der Fehler im Praxistest

Aus Tabelle 13 wird ersichtlich, dass der Einsatz des RFID-Handschuhs eine deutlich Reduzierung der Fehler zur Folge hat. Insgesamt konnten mit dem Prüfmechanismus in der Testphase etwa 50 % der Fehler vermieden werden. Während die Auslassungsfehler um über 80 % reduziert werden, kann für die Typfehler eine Fehlerreduktion von über 30 % festgehalten werden.

Abschließend können die Aussagen der Mitarbeiter zur subjektiven Beurteilung des Systems innerhalb der Interviews nach Abschluss der Testphase zusammengefasst werden. Demnach wird die Ergonomie des Handschuhs als nicht befriedigend bewertet, da das Gerät für einen kontinuierlichen Einsatz über acht Stunden pro Tag zu schwer und zu groß ist. Zudem wird angemerkt, dass die positive und negative Rückmeldung aufgrund von Umgebungsgeräuschen nicht immer trennscharf unterschieden werden konnte. Ein Display am RFID-Handschuh mit einem Ampelsystem als Alternative zur akustischen Rückmeldung könnte den Aussagen der Mitarbeiter zufolge Abhilfe schaffen. Weitere Kritikpunkte sind die Anbringung der Transponder, die träge Reaktion des Handschuhs sowie Probleme bei der Kommissionierung typgleicher Artikel mehrfach hintereinander. Insgesamt waren die Kommissionierer jedoch einstimmig der Meinung, dass der RFID-Handschuh in jedem Fall hilfreich sei, wenn das System stabiler und ergonomischer gestaltet werden kann.

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Im abschließenden Kapitel werden die Grundlagen sowie die erarbeiteten Erkenntnisse des Forschungsprojektes zusammengefasst sowie der Nutzen im industriellen Kontext dargelegt.

7.1 Zusammenfassung

Gerade in Produktion und Logistik wird der Mensch aufgrund seiner Flexibilität sowie sensomotorischen Fähigkeiten trotz einer zunehmend digitalisierten Welt auch in Zukunft ein wichtiger Baustein bleiben. Daher gilt es, Konzepte und Lösungen für eine Mensch-Maschine-Schnittstelle aufzuzeigen, welche bei Bedarf den Eingriff des Menschen in eine virtuelle Welt aus vernetzten, intelligenten Objekten ermöglicht. Die Kombination aus einem mobilen, in den Arbeitsablauf integrierten RFID-Lesegerät und der Visualisierung relevanter Informationen über ein head-mounted Display kann dabei unterstützen. Innerhalb von Montageprozessen kann ein auftragsspezifischer RFID-Transponder an Behältern oder Produkten die kontextbezogene Bereitstellung der für den aktuellen Montageschritt relevanten Informationen anstoßen. Zudem kann der Transponder genutzt werden, um Daten dezentral am Produkt mitzuführen und somit auch für nachgelagerte Prozesse (Wartung, Service etc.) verfügbar zu machen. Aber auch ohne den Einsatz von head-mounted Displays, welche aufgrund ergonomischer Defizite für eine industrielle Arbeitsumgebung aktuell nicht ausreichend entwickelt sind, kann ein RFID-gestütztes System nach den Grundsätzen des Wearable Computing Prozessabläufe in der manuellen Kommissionierung optimieren. Der RFID-Handschuh kann dabei mit verschiedenen Systemen kombiniert werden.

Beim Einsatz des Lesegerätes parallel zur Kommissionierung mit Etiketten oder Papierlisten konnte das Potenzial zur Vermeidung von Fehlern bereits unter Beweis gestellt werden. In mehreren Versuchsreihen wurde die RFID-unterstützte Kommissionierung dabei mit Prozessen ohne technische Hilfsmittel sowie mit Ergebnissen des vorangegangenen Forschungsprojektes „Pick-by-Vision“ – d. h. einer Informationsbereitstellung in der Kommissionierung über ein head-mounted Display – verglichen. Dadurch konnte ein Überblick geschaffen werden, inwiefern der Mitarbeiter durch den Einsatz der beiden Zukunftstechnologien RFID und Augmented Reality unterstützen werden kann. Im Fokus der Evaluation standen dabei die Auswertung von Kommissionierzeit und -fehler sowie die subjektive Beurteilung ergonomischer Aspekte der eingesetzten Hard- und Software durch die Probanden.

Des Weiteren wurde in der Versuchsumgebung des Lehrstuhls fml ein Demonstrator für das Funktionsmuster „Unterstützung von Montageprozessen durch RFID und AR“ aufgebaut, anhand dessen eine kontextbezogene Informationsbereitstellung für die manuelle Montage gezeigt wird. Der Aufbau wurde im Verlauf des Projektes in iterativen Schleifen kontinuierlich weiterentwickelt und basiert auf einer hybriden Datenhaltung aus zentralen und dezentralen Elementen. Grundlage der Informationsbereitstellung sind dabei RFID-Transponder an verschiedenen Objekten im Prozessablauf, welche entweder selbst die relevanten Daten mit sich führen oder die Verknüpfung zu einer zentralen Datenbank herstellen. Durch den Einsatz des RFID-Handschuhs werden während des Arbeitsablaufs nahezu unbemerkt und ohne Zutun des Mitarbeiters Transponder erfasst, woraufhin die Visualisierung der jeweils relevanten Informationen über ein head-mounted Display angestoßen wird. Die für den Montageprozess erforderlichen Informationen stehen so stets zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung. Um eine möglichst ergonomische und intuitive Darstellung der Informationen auf Basis des HMD gewährleisten zu können, wurden verschiedene Richtlinien und Grundsätze zur Gestaltung der Visualisierung berücksichtigt. Zudem wurden im Rahmen des Demonstrators mit einer papierbasierten Montageanleitung sowie einem stationären Datenterminal zwei weitere Systeme zur Darstellung der benötigten Informationen integriert.

7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Gerade bei KMU ist der Anteil manueller Prozessschritte meist sehr hoch, da sich eine Automatisierung oftmals als nicht zielführend erweist. Eine optimierte, kontextbezogene Informationsverarbeitung durch den Einsatz verbesserter Arbeitsassistenzsysteme zur Unterstützung des Werkers kann dabei zur Steigerung der Effizienz und der damit verbundenen Wettbewerbsfähigkeit bei KMU führen. Vor allem durch den Prüfmechanismus mit Hilfe des RFID-Handschuhs in der manuellen Kommissionierung konnte das Potenzial zur Reduzierung von Fehlern sowie die daraus entstehenden Kosten gezeigt werden. Die Versuchsreihe in industrieller Umgebung demonstriert neben den Möglichkeiten des eingesetzten Systems zudem die Kriterien zur weiteren Optimierung desselben. Daraus wird ersichtlich, dass einzelne Komponenten für einen produktiven Einsatz an die spezifischen Anwendungsfälle angepasst werden müssen. Unter dieser Prämisse können die im Forschungsprojekt aufgezeigten Methoden und Vorgehensweisen bei der Gestaltung der einzelnen Systemelemente und der Umsetzung des Systems unterstützen.

Zudem stehen die entwickelten Funktionsmuster und entsprechenden Demonstratoren den beteiligten Industriepartnern sowie interessierten Unternehmen zur Begutachtung und Adaption von Transfermaßnahmen in eigene Prozesse zur Verfügung. Die Finanzierbarkeit und damit verbundene Wirtschaftlichkeit einer industriellen Umsetzung hängt aufgrund der in der vorliegenden Arbeit dargestellten Problemstellungen jedoch nicht unwesentlich von den Entwicklungen des Marktes in den Bereichen head-mounted Display sowie tragbaren RFID-Lesegeräte ab. Findet gerade die HMD-Technologie immer mehr Einsatzfelder auch im Konsumentenmarkt, ist von einer weiteren Verbreitung der Technologie auszugehen. Dadurch steigen Bekanntheitsgrad und Akzeptanz in der Gesellschaft, was die Entwicklungen weiter vorantreiben wird.

Literaturverzeichnis

- [Aar-04] Aarts, E.: Ambient Intelligence: A Multimedia Perspective. In: Multimedia, IEEE, 2004.
- [Alt-03] Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. München (Herbert Utz), 2003.
- [Arn-98] Arnold, D.: Materialflusslehre. Braunschweig (Vieweg), 1998.
- [ART-10] Artesas Konsortium: <http://www.artesas.de/>. Aufruf am 02.08.2010
- [ARV-10a] Arvika Konsortium: <http://www.arvika.de/www/d/home/home.htm>. Aufruf am 02.08.2010
- [ARV-10b] Arvika Konsortium: Style Guide für Augmented Reality Systeme. <http://www.uid.com/arvika/>. Aufruf am 02.08.2010
- [ATK-10] ARToolKit: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>. Aufruf am 02.08.2010
- [AVI-10] Avilus Konsortium: <http://www.avilus.de/>. Aufruf am 02.08.2010
- [Azu-97] Azuma, R. T.: A survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 8/1997, S. 355-385.
- [Azu-01] Azuma, R. T. et al.: Recent Advances in Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6), 11-12/2001, S. 34-47.
- [Bab-05] Baber, C.; Smith, P.; Cross, J.; Zasikowsk, D.; Hunter, J.: Wearable Technology for Crime Scene Investigation. In: Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05), 2005.

- [Bau-07] Bauer, M. A.: Tracking Errors in Augmented Reality. München, 2007.
- [Beu-81] Beuche, E.: Alternative Teilungstiefen bei manueller Montage. Dissertation, TU Berlin, 1981.
- [Bow-01] Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J. J. Jr.; Poupyrev, I.: An Introduction to 3-D User Interface Design. In: Presence, Vol. 10, No. 1, February 2001, 96 –108.
- [Bow-05] Bowman, D. A.: 3D user interfaces – Theory and practice. Boston, Mass.: Addison-Wesley, 2005.
- [Bry-95] Brynzér, H.; Johansson, M. I.: Design and performances of kitting and order picking systems. In: International Journal of production economics, 41/1995, S. 115-125.
- [Bul-86] Bullinger, H.-J.: Systematische Montagesystemplanung. München, Wien (Hanser), 1986.
- [Chr-03] Christ, O.; Fleisch, E.: Ubiquitous Computing: Von der Vernetzung von Computern zur Vernetzung von Dingen. In: Österle, H.; Winter, R.: Business Engineering. Auf dem Weg zum Unternehmen des Informationszeitalters. Berlin: Springer, 2003.
- [Dei-08] o.V.: deBus UDL/UDK Protocol V1.35. deister electronic GmbH, Barsinghausen, 2008
- [Did-10] Didier, M.: Arbeitswissenschaftliche Herausforderungen durch Aml. In: Aml und Arbeitswissenschaften – Chancen und Risiken neuer I&K-Technologien in der Arbeitsumgebung, Tagungsunterlagen, 15.01.2010.
- [DIN13407] DIN EN ISO 13407: Benutzerorientierte Gestaltung interaktiver Systeme. Berlin (Beuth), 2000.
- [DIN8593-0] DIN 8593, Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einnormung, Unterteilung, Begriffe. Berlin (Beuth), 2003.
- [DIN9241] DIN EN ISO 9241: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Berlin (Beuth), 2001.
- [DLA-06] Deutsche Logistik Akademie: Analyse und Bewertung von Kommissioniersystemen. Seminarunterlagen, München, 09.-10.5.2006.

- [Dul-05] Dullinger, K.-H.: Das richtige Kommissionier-Konzept – eine klare Notwendigkeit. In: Jahrbuch Logistik 2005. Düsseldorf (Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH), 2005, S. 194-198.
- [EPC-08] EPCglobal Inc. (2008): EPCTM Radio-Frequency Identity Protocols, Class-1 Generation-2 UHF RFID, Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz, Version 1.2.0. URL: http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/uhfc1g2/uhfc1g2_1_2_0-standard-20080511.pdf.
- [EPC-10] EPCglobal Inc. (2010): EPC Tag Data Standard. URL: http://www.gs1.org/gsmp/kc/epcglobal/tds/tds_1_5-standard-20100818.pdf.
- [Eve-89] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 4 – Fertigung und Montage. Düsseldorf (VDI-Verlag), 1989.
- [Eve-96] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik Band 1 – Grundlagen. Düsseldorf (VDI-Verlag), 1996.
- [Fel-05] Feldman, A.; Tapia, E. M.; Sadi, S.; Maes P.; Schmandt, C.: ReachMedia: On-the-move interaction with everyday objects. In: Proceedings of the Ninth IEEE international Symposium on Wearable Computers, 2005, S. 52-59.
- [Fin-08] Finkenzeller, K.: RFID Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. München (Hanser), 2008.
- [Fis-05] Fishkin, K.; Philipose, M.; Rea, A.: Hands-On RFID: Wireless Wearables for Detecting Use of Objects. In: Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05), 2005.
- [Fle-01] Fleisch, E.: Business perspectives on Ubiquitous Computing. Institute of Information Management, University of St. Gallen, 30.11.2001.
- [Fle-05] Fleisch, E.; Mattern, F.: Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis. Berlin, Heidelberg, New York (Springer), 2005.
- [Fri-04] Friedrich, W. (Hrsg.): ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. Erlangen (Publicis Corporate Publishing), 2004.
- [Gud-05] Gudehus, T.: Logistik, 3. Auflage. Berlin (Springer), 2005.

- [Gün-09] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R.; Schedlbauer, M.: Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Garching, 2009.
- [Han-04] Haner, U.-E.; Greisle, A.: Positionierungssysteme. In: wt Werkstatttechnik online 94 (2004), No.1/2, S. 7-10.
- [Har-93] Hartmann, M.: Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage. Aachen (Shaker), 1993.
- [Ibe-09] Iben, H.; Baumann, H.; Klug, T.; Ruthenbeck, C.: Visual Based Picking Supported by Context Awareness – Comparing Picking Performance Using Paper-based Lists Versus List Presented on a Head Mounted Display with Contextual Support. In: ICMI-MLMI'09, Cambridge, MA, USA, 2009.
- [IFF-10] http://www.iff.fraunhofer.de/iffdb_files/images/792_rfid_handschuh_foto_dirk_mahler_iff.jpg. (26.10.2010).
- [iwb-08] Fügetechnik
Vorlesungsskriptum: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Technische Universität München, 2008
- [Ker-07] Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. Berlin (Springer), 2007.
- [Kir-10] Kirch, M.; Voigt, M.; Poenicke, O.; Richter, K.: Intelligente Infrastrukturen und Transportmittel zur kontinuierlichen Warenverfolgung. In: ISIS AutoID/RFID Special, 2010.
- [Kwi-93] Kwijas, R.: Kommissionieren heute – Stand der Technik und Verfahren. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Berichte Nr. 1051 – Kommissionieren. Düsseldorf (VDI-Verlag), 1993, S. 1-10.
- [Lam-05] Lampe, M.; Strassner, M.; Fleisch, E.: A Ubiquitous Computing Environment for Aircraft Maintenance. Institute of Technology Management, University of St. Gallen, 2005.
- [Lan-02] Lang, P.; Kusej, A.; Pinz, A.; Brasseur, G.: Inertial Tracking for Mobile Augmented Reality In: IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, Anchorage, AK, USA, 21-23 May 2002.

- [Lee-10] Lee, C.; Kim, M.; Park, J.; Oh, J.; Eom, K.: Design and Implementation of the wireless RFID Glove for life applications. In: International Journal of Grid and Distributed Computing Vol. 3, No. 3, 2010.
- [Lin-09] Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 3., korrigierte Auflage. Berlin, Heidelberg (Springer), 2009.
- [Lip-04] Lipp, L.: Interaktion zwischen Mensch und Computer im Ubiquitous Computing. Münster (Lit Verlag), 2004.
- [Liu-10] Liu, H.; Bo, L.: Research on the visualization of GSM-R field strength testing data. 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, Vol. 4, S. 595 – 600.
- [Lol-03] Lolling, A.: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten. Dissertation, Universität Dortmund, 2003.
- [Lot-92] Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage – Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. Düsseldorf (VDI-Verlag), 1992.
- [Luk-07] P. Lukowicz et al.: The wearIT@work Project: Toward Real-World Industrial Wearable Computing. In: IEEE Pervasive Computing, vol. 6, no. 4, 2007, S. 8–13.
- [Lün-05] Lünig, R.: Beitrag zur optimierten Gestaltung des Durchsatzes in Kommissioniersystemen für Stückgüter. Tagungsband 22, Deutscher Logistikkongress 2005, S. 182-189.
- [Lus-07] Lustig, C.; Novatchkov, H.; Dunne, L.; McHugh, M.; Coyle, L.: Using Co-location to Support Human Memory. In: Workshop “Supporting Human Memory with Interactive Systems”, HCI Conference, Lancaster, UK, 2007.
- [Mas-01] Mason, A. H.; Walji, M. A.; Lee, E. J.; MacKenzie, C. L.: Reaching Movements to Augmented and Graphic Objects in Virtual Environments. In: CHI 2001, Conference on Human Factors in Computing Systems, Seattle, Washington, USA, 31 March-5 April 2001.
- [Mei-09] Meissner, S.: Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung. Dissertation, TU München, 2009.

- [Mel-96] Melzer, J.; Moffitt, K.: Head Mounted Displays – Designing for the User. New York (McGraw-Hill), 1996.
- [Mil-94] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. SPIE Vol. 2351, Telem manipulator and Telepresence Technologies, 1994, S. 282-292.
- [Mil-99] 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. Berlin (Springer), 1999, S. 1-16.
- [Mug-09] Mugira, L.; Vazquez, J. I.; Arruti, A.; Ruiz de Garibay, J.; Mendia, I.; Renteria, S.: RFIDGlove: A Wearable RFID Reader. In: IEEE International Conference on E-Business Engineering, 2009, S. 475-480.
- [Pat-04] Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. iw b Forschungsbericht 190 und zugleich Dissertation, TU München. München (Herbert Utz), 2004.
- [Pat-05] Patterson, D. J.; Fox, D.; Kautz, H.; Philipose, M.: Fine-Grained Activity Recognition by Aggregation Abstract Object Use. In: Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05), 2005.
- [Phi-04] Philipose, M.; Fishkin, K.; Perkowitz, M.; Patterson, D.; Hähnel, D.: Inferring Activities from Interactions with Objects. In: Pervas ive computing, IEEE, 2004.
- [Pus-08] Pustka, D.; Klinker, G.: Dynamic Gyroscope Fusion in Ubiquitous Tracking Environments. In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008. 15.-18. Sep-tember, Cambridge, UK, S. 13-20.
- [Oeh-04] Oehme, O.: Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service. Dissertation, RWTH Aachen, 2004.
- [Rad-99] Radow, W.: Informationsmanagement in der manuellen Montage. Fortschrittsbericht VDI Reihe 2 Nr. 514. Düsseldorf (VDI Verlag), 1999.
- [Rei-06] Reinhart, G.: Fabrikplanung. Skriptum zur Vorlesung. München, 2006.

- [Rei-09] Reif, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems. Dissertation, TU München, 2009.
- [Rol-08] Rolland, J. P.; Baillot, Y.; Goon, A. A.: A survey of tracking technology for virtual environments. In: Augmented Reality and Wearable Computers. Ed. Bardfield and Caudell, 2000.
- [Sas-08] Saske, B.: Augmented Reality in der Instandhaltung. Dissertation, TU Dresden. München (Dr. Hut Verlag), 2008.
- [ScA-00] Schmidt, A.; Gellersen, H.-W.; Merz, Chr.: Enabling Implicit Human Computer Interaction A Wearable RFID-Tag Reader. In: The Fourth International Symposium on Wearable Computers, IEEE, 2000.
- [ScR-00] Schmidt, R. F.; Lang, F.: Physiologie des Menschen. 30. Auflage. Berlin (Springer), 2000.
- [ScR-10] Scholz-Reiter, B.; Ruthenbeck, C.; Harjes, F.; Meinecke, Chr.: Informationsmanagement in der Logistik unterstützt durch Wearable Computing – Ein neuer Ansatz für das Informationsmanagement am Beispiel der Automobillogistik. In: Industrie Management, GITO-Verlag, 2010.
- [Sma-10] <http://www.smart-TEC.com>. (13.12.2010).
- [Sti-08] Steifmeier, T.; Roggen, D.; Ogris, G.; Lucowicz, P.; Tröster, G.: Wearable Activity Tracking in Car Manufacturing. In: IEEE Pervasive Computing, Mobile and Ubiquitous Systems, vol. 7, no. 2, 2008, S. 42–50.
- [Str-02] Stricker, D.: Computer-Vision-basierte Tracking- und Kalibrierungsverfahren für Augmented Reality. Dissertation TU Darmstadt, 2002.
- [Sut-06] Suthau, T.: Positionsgenaue Einblendung räumlicher Informationen in einem See Through Head Mounted Display für die Medizin am Beispiel der Leberchirurgie. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006.
- [Tam-10] Tamm, G., Tribowski, C.: RFID (Informatik Im Fokus). Berlin (Springer), 2010.
- [ten-04] ten Hompel, M.; Schnidt, T.; Nagel, L.: Warehouse Management – Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen, 2. Auflage. Berlin (Springer Verlag), 2004

- [Tüm-08] Tümler, J.; Mecke, R.; Doil, F.; Huckauf, A.; Urbina, M. H.; Roggentin, A.; Pfister, E. A.; Böckelmann, I.: Einbeziehung der Herzratenvariabilität für eine objektive Beanspruchungsanalyse beim Einsatz mobiler Augmented Reality an einem Referenzarbeitsplatz. In: 50. Fachausschusssitzung Anthropotechnik – Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V., Manching, 22.-23.10.2008.
- [VDI-10] http://www.vdi-nachrichten.com/vdi-nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?cat=2&id=20838. (13.12.2010).
- [VDI3311] VDI 3311: Beleglose Kommissioniersysteme. Berlin (Beuth), 1998.
- [VDI3590] VDI 3590, Blatt 1: Kommissioniersysteme – Grundlagen. Berlin (Beuth), 1994.
- [Vie-00] Viehrig, J.: Demontage, Montage und Maschinenumstellung im Rahmen der Instandhaltung. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): Instandhaltung von Maschinen, Geräten und maschinentechnischen Ausrüstungen sowie Gebäuden und baulichen Anlagen. Dortmund, Berlin (Wirtschaftsverlag NW), 2000.
- [Vog-97] Vogt, G.: Das neue Kommissionierhandbuch, Sonderpublikation der Zeitschrift Materialfluss. Landsberg (Verlag moderne Industrie GmbH), 1997.
- [Wag-05] Wagner, M.: Tracking with multiple Sensors. Dissertation, Technische Universität München, 2005.
- [Wei-91] Weiser, M.: The Computer for the 21st Century. In: Scientific American, 1991.
- [Wei-99] Weidenbach, M.; Wick, C.; Pieper S.; Redel, D. A.: Augmented Reality in der Echokardiographie. Darmstadt (Steinkopf Verlag), 1999.
- [Wil-01] Willnecker, U.: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Dissertation, TU München, 2001.
- [Wit-06] Witt, H.; Kenn, H.: Towards Implicit Interaction by Using Wearable Interaction Device Sensors for more than one Task. In Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems (IEE Mobility Conference), Bangkok, Thailand, 2006.

- [Woo-03] Wootley, S. I.; Cross, J. W.; Ro, S.; Foster, R.; Reynolds, G.; Baber, C.; Bristow, H.; Schwirtz, A.: Forms of wearable computer. Electronic, Electrical and Computer Engineering, The University of Birmingham, U.K., 2003.

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AP	Arbeitspaket
AR	Augmented Reality
AutoID	Automatische Identifikation
AV	Augmented Virtuality
EPC	Elektronischer Produktcode
fml	(Lehrstuhl für) Fördertechnik Materialfluss Logistik
HMD	head-mounted Display
IC	Integrated Circuit
MDT	Mobiles Datenterminal
RFID	Radiofrequenz Identifikation
RV	Reality-Virtuality-Continuum
VR	Virtual Reality

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Mensch im Internet der Dinge (in Anlehnung an [Fle-05])	2
Abbildung 2: Informationsbereitstellung mit RFID und AR	4
Abbildung 3: Komponenten eines RFID-Systems	9
Abbildung 4: Polarisation elektromagnetischer Wellen [Fin-08]	11
Abbildung 5: Aufbau von Transpondern	12
Abbildung 6: Speicherorganisation EPC Class 1 gen2 Transponders [EPC-08]	13
Abbildung 7: Reality-Virtuality-Continuum ([Mil-94], [Reif-09])	14
Abbildung 8: Überlagerung von realen und virtuellen Objekten [Alt-03] (li.), Anwendung in der Kommissionierung [Gün-09] (re.)	16
Abbildung 9: Komponenten eines Augmented Reality Systems [Rei-09]	17
Abbildung 10: Einteilung von Visualisierungsmedien (in Anlehnung an [Rei-09])	18
Abbildung 11: Optical see-through HMD – Funktionsprinzip [Azu-97]	20
Abbildung 12: Video see-through HMD - Funktionsprinzip [Azu-97]	20
Abbildung 13: Aufbau eines Trackingsystems [Rei-09]	22
Abbildung 14: Outside-in, inside-out und inside-in Tracking [Rei-09]	22
Abbildung 15: Passive Marker/ Targets für Videosysteme (li.) und IR-Systeme (re.) [Rei-09]	24
Abbildung 16: Einordnung der manuellen Montage (vgl. [Beu-81])	29
Abbildung 17: Gründe für den Einsatz einer manuellen Montage (vgl. [Rad-99])	30
Abbildung 18: Organisationsformen in der Montage (vgl. [Eve-96])	31
Abbildung 19: Ablauffunktionen beim Kommissioniervorgang [Vog-97]	33
Abbildung 20: Einteilung eines Kommissioniersystems (vgl. [VDI3590])	35
Abbildung 21: Kommissioniersteuerung	36

Abbildung 22: Vergleich von beleggebundenem und -losem Kommissionieren [VDI3311]	37
Abbildung 23: Gestaltung eines tragbaren RFID-Lesegerätes ([Phi-04], [Lus-07], [IFF- 10])	44
Abbildung 24: Gestaltung eines HMD	47
Abbildung 25: Einsatzszenarien des Zielsystems – Branchen und Produkte	50
Abbildung 26: Einsatzszenarien des Zielsystems – Prozesse	50
Abbildung 27: Einflussportfolio zur Gewichtung der Bewertungskriterien	53
Abbildung 28: Nutzwertanalyse - Auswertung	55
Abbildung 29: Anforderungsanalyse	62
Abbildung 30: Darstellung des Anzeigebereichs am HMD	70
Abbildung 31: Bereichseinteilung für verschiedene Informationsarten	71
Abbildung 32: Konzept „ARVIKA“ – Screenshots	74
Abbildung 33: Konzept „Kreisnavigation“ – Screenshots	77
Abbildung 34: Konzept „Imaginäres Band“ – Screenshots	80
Abbildung 35: Visualisierungs- und Interaktionskonzept – Screenshots	84
Abbildung 36: Informationsdarstellung im Referenzprozess	86
Abbildung 37: Interaktion im Referenzprozess	87
Abbildung 38: Referenzprozess – Übersicht	89
Abbildung 39: Referenzprozess - Montagenähe Kommissionierung	90
Abbildung 40: Referenzprozess - Manuelle Montage	91
Abbildung 41: Theoretische Lesereichweite ALN-9640 Squiggle (li.), Produktbild (re.)	96
Abbildung 42: Theoretische Lesereichweite Mini Metal Special Tag H3 (li.), Produktbild (re.)	97
Abbildung 43: Produktbild Liteye LE-750A	99
Abbildung 44: Einsatz eines Trackingsystems zur Hervorhebung des Lagerfachs	100
Abbildung 45: Komponenten des Trackingsystems im Referenzprozess	100
Abbildung 46: Interaktionsgeräte – RFID-Handschuh (li.) und Dreh-/ Drückknopf (re.)	102
Abbildung 47: Montageprozessen in der Konsumgüterindustrie (in Anlehnung an [iwb-08])	104

Abbildung 48: Montageobjekt Schraubstock	105
Abbildung 49: Montagevorranggraph	106
Abbildung 50: Dokumentenorientierte Informationsstruktur	108
Abbildung 51: Datenbankorientierte Informationsstruktur im Referenzprozess (in Anlehnung an [Rad-99])	109
Abbildung 52: Dezentrale Datenhaltung im Referenzprozess	111
Abbildung 53: Entity-Relationship-Modell der zentralen Datenbank im Referenzprozess	113
Abbildung 54: Komponenten des Funktionsmusters "Montageunterstützung"	115
Abbildung 55: Demonstrator des Funktionsmusters "Montageunterstützung"	116
Abbildung 56: Lagereinrichtung "Fachbodenregallager"	118
Abbildung 57: Lagereinrichtung "Gitterboxlager" (nachgestellt)	119
Abbildung 58: Alternative Konzepte zur Anbringung der Transponder im Funktionsmuster „Kommissionierung“	120
Abbildung 59: Reduzierung der Komponenten im Funktionsmuster "Kommissionierung"	121
Abbildung 60: Kommissionierzeit und Kommissionierzeit mit Lerneffekt	126
Abbildung 61: Kommissionierfehlerquote und Fehlerquote mit Lerneffekt	127
Abbildung 62: Fehlerarten	128
Abbildung 63: Zeit-/Fehler-Portfolio je Proband und Variante (li.) bzw. je Proband (re.)	129
Abbildung 64: Kommissionierzeit und -fehler im System „Pick-by-Vision“ [Gün-09]	130
Abbildung 65: Motivation und Belastung (inkl. Standardabweichung)	132
Abbildung 66: Subjektive Bewertung des RFID-Handschuhs	133
Abbildung 67: Bewertung des RFID-Handschuhs im Vergleich	134
Abbildung 68: Lagerumgebung im Praxistest (schematisch)	135
Abbildung 69: Analyse des Greifmusters im Praxistest	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Frequenzbereiche von RFID-Systemen	10
Tabelle 2: Vergleich zwischen OST- und VST-Systemen	21
Tabelle 3: Fehlerquoten in der Kommissionierung [Lol-03]	38
Tabelle 4: Einordnung des Zielsystems (manuelle Montage)	57
Tabelle 5: Einordnung des Zielsystems (montagenahe Kommissionierung)	59
Tabelle 6: Konzeptbewertung - Ergebnis	83
Tabelle 7: Befehlsnachricht im deBus Protokoll [Dei-08]	93
Tabelle 8: Antwortnachricht im deBus Protokoll [Dei-08]	94
Tabelle 9: Auftragsstruktur bei der Evaluation im Labortest	125
Tabelle 10: Probandenstruktur bei der Evaluation im Labortest	125
Tabelle 11: Vergleich der Potenziale der Funktionsmuster aus den Projekten "Pick-by-Vision" und "Papierlose Produktion und Logistik"	131
Tabelle 12: Übersicht über Identifikationsvorgänge im Praxistest	137
Tabelle 13: Reduzierung der Fehler im Praxistest	139

Anhang A: Elementare Montageprozesse

Zur Ermittlung der prozessrelevanten Informationen wird im Forschungsprojekt für den Bereich der manuellen Montage die Einteilung der elementaren Montageprozesse nach den Hauptfunktionen Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Fördern und Lagern herangezogen. Nach [Har-93] können für die einzelnen Montagefunktionen jeweils relevante Informationen identifiziert werden.

LAGERN	Teilfunktionen	Identifizieren	Einlagern	Auslagern
		Verwalten	Aufbewahren	Kontrollieren
	Funktionsbeschreibende Daten	Bereitstellungsstrategien	Lagerfunktion	Lagerorganisation
		- direkt	- Handlager	- Festplatzlagerung
		- indirekt	- Bereitstellager	- Zonung
		- Handlager	- Kommissionierlager	- Querverteilung
		Anzahl und Art an Lagerunterlagen	- Verwahrager	- Chaotische Lagerung
		- Vorratslager	- Fifo (First in first out)	
		- Umschlagslager	- Mengenanpassung	
			- Wegoptimierte Lagerung	
			- Lifo (Last in First out)	
	Produktdaten	Oberflächenbeschaffenheit	Schwerpunktlage	Länge
		Produktstruktur	Befestigungsmöglichkeiten	Durchmesser
		Verhalten im Verband	Lagergutbelastung	Hüllvolumen
		Einzelverhalten	Höhe	Material
		Stapelfähigkeit	Breite	Gewicht
		Empfindlichkeit (Bruch-, Stoß-)	Lagestabilität	
	Prozessdaten	Lagerprinzip	Lagergutfläche	Tragfähigkeit
		Lagerhilfsmittel (s. Fördermittel)	Lagerfläche (ges.)	Erweiterungsfähigkeit
		Automatisierungsgrad	Lagergutvolumen	Wareneingänge
Flexibilität bei Artikeländerung		Lagervolumen (ges.)	Warenausgänge	
direkter Zugriff auf alle Ladeeinheiten		Zugriffsdauer	Umschlag	
Positionen		Zugriffe		

HANDABEN				
Teilfunktionen	Speichern	Zuteilen	Schwenken	Halten
	geordnetes Speichern	Verzweigen	Orientieren	Lösen
	teilgeordnetes Speichern	Zusammenführen	Positionieren	Spannen
	Mengen verändern	Sortieren	Ordnen	Entspannen
	Teilen	Bewegen	Führen	Kontrollieren
	Vereinigen	Drehen	Weitergeben	
	Abteilen	Verschieben	Sichern	
	Handhabungsablauf	Belastungen (Lärm)	Bewegungsrichtung	Gesamstückzahl
	Handhabungsweg	Handhabungslage	Länge Energieversorgung	
	Zugänglichkeit	Handhabungsort	Losgröße	
Funktionsbeschreibende Daten	Innenform	Masseverteilung	Streckgrenze	Höhe/Breite/Länge
	Außenform	Wirtteile	Schwerpunktlage	Durchmesser
	Formelemente	Flachteile	Rollfähigkeit	Hüllvolumen
	Gleitfähigkeit	Zylinderteile	Stapelbarkeit	Material
	elektrische Leitfähigkeit	Kugelteile	Temperaturbeständigkeit	Gewicht
	Wärmeleitfähigkeit	Härte	Oberflächengüte	Empfindlichkeit
	Korrosionsbeständigkeit	Zugfestigkeit	Ordnungszustand	Lagestabilität
	Zuführungsgeschwindigkeit	Positioniergenauigkeit	Geometrie Wechselsystem	Übersetzung
	Greifweg	Programmierbar	Antiebsprinzip	Handhabungsmittel
	Vibrationsfrequenz	Programmüberwachung	dynamische Daten	Programmierbar
Prozessdaten	Gleitneigung	Übergabepinzip	Leistungsdaten	Handhabungsmittel

FÜGEN				
Teilfunktionen	Auflegen	Tränken	Einschlagen	Nieten
	Einlegen	Schrauben	Verkeilen	Schmelzsweißen
	Ineinanderschieben	Klammern	Verspannen	Preßsweißen
	Einhängen	Klemmen	Heften	Löten
	Einrenken	Einpressen	Bördeln	Kleben
	Federn Einspreizen	Schrumpfen	Falzen	
	Einfüllen	Dehnen	Quetschen	
	Fügeweg	Stabilität der Fügelege	Relationen der Fügepartner	Losgröße
	Fügeablauf	Fügetoleranz	erforderliche Vor- bzw. Nachbehandlung	Stückzahl
	Fügebewegung	Handhabungsgewicht	Belastung (Umwelt, Personal)	
Funktionsbeschreibende Daten	Fügereihenfolge	Fügeort	Art und Anzahl der Unterlagen	
	Fügerichtung	Fügelege	Zugänglichkeit	
	Anzahl Einzelteile	Justiermöglichkeiten	Steifigkeit	Breite
	Anzahl Baugruppen	Hauptträgersachsen	Verformung	Länge
	Anzahl vormontierbarer Baugruppen	Toleranzen	Temperaturbeständigkeit	Durchmesser
	Erzeugnisstruktur	Passungen	Oberflächengüte	Hüllvolumen
	Innenform	Härte	Rauhtiefe	Material
	Außenform	Zugfestigkeit	Fügestellenbeschaffenheit	Gewicht
	Greifmöglichkeiten	Streckgrenze	Schweißbarkeit	Empfindlichkeit (Bruch-, Stoß-)
	Befestigungsmöglichkeiten	Beleuchtung	Höhe	Lagestabilität
Produktdaten	Drehmoment	Einpreßtiefe	Zusatzwerkstoff (Schutzgas)	Automatisierungsgrad
	Drehwinkel	Fügekraft	Temperatur	Flexibilität
	Einschraubtiefe	Schmiermittel	dynamische Daten	Anzahl spezifischer Betriebsmittel
	Viskosität	Taktzeit	Positioniergenauigkeit	Art spezifischer Betriebsmittel
	Aushärtezeit	Fügeschwindigkeit	Leistungsdaten	Fügemittel

Anhang B: Bewertung der Einsatzszenarien

Zur Gewichtung und Priorisierung werden die Bewertungskriterien zur Auswahl der Einsatzszenarien des Zielsystems mittels einer Einflussmatrix einander gegenübergestellt. Die Ergebnisse fließen im Anschluss daran in eine Nutzwertanalyse zur Untersuchung der verschiedenen Unternehmensbereiche bzw. -prozesse hinsichtlich des Zielerfüllungsgrades der einzelnen Bewertungskriterien ein.

Einflussmatrix													
Priorisierung der Bewertungskriterien													
0: keinen Einfluss 1: schwacher Einfluss 2: mittlerer Einfluss 3: starker, unmittelbarer Einfluss													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	Kritikalität (=AxB)				
Beherrschung hoher Variantenvielfalt	3	3	2	1	2	2	1	1	15	0,197	12	1,25	180
Reduzierung von Fehleranteilen	1	3	0	1	0	2	1	1	9	0,118	12	0,75	108
Sicherung der Produktqualität	2	3	0	0	0	1	1	1	8	0,105	12	0,67	96
Reduzierung von Basiszeiten	0	1	1	1	1	1	0	0	5	0,066	6	0,83	30
Reduzierung von Totzeiten	1	1	1	1	1	2	1	0	8	0,105	8	1,00	64
Erhöhung der Flexibilität	2	1	2	1	1	1	1	0	9	0,118	5	1,80	45
Technische Umsetzbarkeit	2	1	1	1	1	1	2	0	9	0,118	11	0,82	99
Arbeitssicherheit/ Ergonomie	2	1	1	0	2	1	1	0	7	0,092	7	1,00	49
Training/ Ausbildung von MA	2	1	1	0	1	1	0	0	6	0,079	3	2,00	18
Passivsumme	12	12	6	8	5	11	7	3					

NUTZWERTANALYSE relevanter U.-bereiche/Prozesse	Unternehmensbereich												Gewichtung (Einfl.-matrix)		
	Montage		Kommissionierung/ Bereitstellung		Wartung		Wareneingang		Qualitätssicherung		Demontage/ Recycling			Training/ Ausbildung	
	abs.	gew.	abs.	gew.	abs.	gew.	abs.	gew.	abs.	gew.	abs.	gew.		abs.	gew.
Beherrschung hoher Variantenvielfalt	3	0,592	2	0,395	2	0,395	1	0,197	1	0,197	3	0,592		0,000	0,197
Reduzierung von Fehleranteilen	2	0,237	3	0,355	1	0,118	1	0,118	2	0,237	1	0,118	1	0,118	0,118
Sicherung der Produktqualität	2	0,211		0,000	2	0,211	1	0,105	2	0,211		0,000	1	0,105	0,105
Reduzierung von Basiszeiten	2	0,132	1	0,066	2	0,132	1	0,066	1	0,066	1	0,066		0,000	0,066
Reduzierung von Totzeiten	2	0,211	1	0,105	2	0,211	1	0,105	1	0,105	2	0,211		0,000	0,105
Erhöhung der Flexibilität	2	0,237		0,000		0,000		0,000		0,000	1	0,118		0,000	0,118
Technische Umsetzbarkeit	1	0,118	3	0,355	1	0,118	2	0,237		0,000	1	0,118	2	0,237	0,118
Arbeitssicherheit/ Ergonomie	2	0,184	2	0,184	1	0,092		0,000	1	0,092	2	0,184	2	0,184	0,092
Training/ Ausbildung von MA	2	0,158	1	0,079	2	0,158		0,000	1	0,079	1	0,079	3	0,237	0,079
(absolut/gewichtet)	18	2,08	13	1,54	13	1,43	7	0,83	9	0,99	12	1,49	9	0,88	
Σ	22,5%		16,7%	15,5%	9,0%	10,7%	16,1%	9,5%							
Rang (gew.)	1	2	4	7	5	3	6								

Anhang C: Lastenheft

Nr.	Anforderung	Zielstellung	Erläuterung
I Allgemeine Anforderungen (zum Ablauf des Projektes)			
1	Informationsbereitstellung mittels RFID-Transponder	gewährleisten	RFID-Transponder können sich an verschiedenen Objekten befinden. (Ladungsträger, Behälter, Produkte, Werkzeug etc.)
2	Visualisierung der Informationen über HMD	gewährleisten	Prozessrelevante Informationen werden über ein HMD bereitgestellt, alternative Visualisierungsmedien werden jedoch ebenfalls berücksichtigt.
3	Modularer Systemaufbau	gewährleisten	Die RFID- und AR-Komponenten werden modular aufgebaut. Die Anwendung soll bspw. um das Tracking-system erweitert bzw. reduziert werden können.
4	Konkrete Einsatzszenarien	definieren	Es wird aufgezeigt, in welchen Bereichen das Zielsystem die größten Potenziale aufweist.
5	Nicht wertschöpfender Prozesse	Prozesszeiten reduzieren	Nicht wertschöpfende Tätigkeiten wie bspw. das Suchen von Informationen werden reduziert.
6	Hohe Variantenvielfalt	beherrschen	Das System berücksichtigt eine möglichst detaillierte Bereitstellung von Informationen. Über die Visualisierung mittels HMD kann explizit auf Besonderheiten im Prozess hingewiesen werden.
7	Qualitätssteigerung von Arbeitsabläufen	manuelle Fehler reduzieren	Potenzielle Fehlerquellen im Prozess werden ermittelt und berücksichtigt (Bsp.: Kommissionierfehler).
II Organisatorische Anforderungen (zum Ablauf des Projektes)			
1	Entwicklung eines Funktionsmusters ohne Tracking	gewährleisten	Es wird ein möglichst einfaches, robustes und kostengünstiges System entwickelt.
2	Entwicklung eines Funktionsmusters mit Tracking	gewährleisten	Die Vorteile der dynamischen Bereitstellung von Informationen werden berücksichtigt.
3	Funktionsfähiger Versuchsaufbau/Demonstrator	gewährleisten	Es wird ein Demonstrator aufgebaut, der nach Abschluss des Projektes am Lehrstuhl fml verbleibt und die Funktion des Zielsystems vollständig abbildet.
4	Durchführung von Laborversuchen	gewährleisten	Nach der Entwicklung eines funktionsfähigen Demonstrators werden an diesem Versuche zur Evaluation der Funktionsmuster durchgeführt.
5	Durchführung von Praxisversuchen	gewährleisten	Das erarbeitete Zielsystem wird in industrieller Umgebung evaluiert. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit den Laboruntersuchungen verglichen.
6	Dokumentation der Ergebnisse	gewährleisten	Die Projektergebnisse werden in Veröffentlichungen und einem abschließenden Bericht dokumentiert.

Nr.	Anforderung	Zielstellung	Erläuterung
III Technologische Anforderungen			
1	Robustheit des Systems	hoch	Der Systemaufbau genügt hinsichtlich der Robustheit den Ansprüchen industrieller, teils rauer Umgebung.
2	Wartungsaufwand	gering	Wartungsaufwand und Aufwand zur individuellen Anpassung des Gesamtsystems werden minimiert.
3	Akkulaufzeit	min. 4 h	Die Akkulaufzeit der einzelnen Komponenten wird auf 4 Stunden ausgelegt. Ein Batteriewechsel zur (Mittag-) Pause bzw. zum Schichtwechsel wird akzeptiert.
4	Gewicht	gering	Bei der Entwicklung des Systems und Auswahl der einzelnen Systemkomponenten (RFID-Handschuh, HMD, Recheneinheit) wird auf ein geringes Gewicht geachtet, welches für einen 8 stündigen Arbeitstag geeignet ist.
5	Gleichzeitiger Zugriff auf Daten durch mehrere MA	gewährleisten	Bei der Konzeptionierung der Datenhaltung wird die Möglichkeit für einen parallelen Zugriff auf die Daten durch mehrere Teilnehmer berücksichtigt.
6	Durchgängig drahtlose Datenübertragung	gewährleisten	Auf Kabelverbindungen zwischen Mitarbeiter und Arbeitsplatz wird verzichtet.
7	Patente und Schutzrechte	beachten	Bei der Entwicklung des Gesamtsystems wird auf bestehende Patente und Schutzrechte geachtet.
IV Ergonomie			
1	Verfügbarkeit beider Hände	hoch	Die Informationen werden bei höchster haptischer Verfügbarkeit beider Hände bereitgestellt.
2	Ergonomische Informationsdarstellung	intuitiv, eindeutig	Die Informationsdarstellung unterstützt eine schnelle, intuitive Aufnahme der Informationen. Dabei werden ergonomische Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt.
3	Arbeitsmedizinischer Erfordernisse	beachten	Bei der Gestaltung der Arbeitsplätze (Einsatzszenarien/ Demonstrator) werden arbeitsmedizinische Aspekte beachtet.
4	Mensch-Maschine-Interaktion	gering	Die erforderlichen Aktivitäten zur Interaktion des Mitarbeiters mit dem System werden möglichst gering gehalten.
5	Latenzzeit bei der Informationsdarstellung	max. 60 ms	Die Latenzzeit bestimmt, wie angenehm der Mensch das Bild empfindet. Bei einer zu hohen Latenzzeit ruckelt das Bild. Dies wirkt auf Dauer störend.
6	Lastverteilung des HMD (Schwerpunkt)	optimieren	Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen Untersuchungen ergaben, dass eine ungünstige Lastverteilung des HMD Kopfschmerzen bei Anwendern verursachen kann.
V Akzeptanz			
1	Bedienbarkeit	intuitiv, einfach	Das Ziel einer möglichst kurzen Einlernphase erfordert eine intuitive Bedienbarkeit. Es werden bekannte Metaphern verwendet.
2	Aufwand für Schulungsbedarf	gering	Bei der Entwicklung des Visualisierungskonzeptes wird eine intuitive Bedienbarkeit fokussiert.
3	Störung von Arbeitsabläufen	vermeiden	Das System vereinfacht den bisherigen Arbeitsablauf und erfordert keine zusätzlichen Bewegungen des MA.
4	Datenmissbrauch (pers.-bez. Auswertung)	vermeiden	Die Möglichkeit zum Missbrauch der digital erhobenen Daten (z. B. Überwachung der Kommissionierleistung) wird entgegengewirkt.
5	Tests zur Identifikation von Nutzerakzeptanz	gewährleisten	Bei der Evaluation der Funktionsmuster werden neben der Bewertung einer möglichen Veränderung der Arbeitsleistung zudem Informationen zur Bewertung der Nutzerakzeptanz erhoben.
6	Alternative Visualisierungskonzepte	vergleichen	Es werden alternative Konzepte zur Visualisierung der relevanten Informationen sowie zur Steuerung der Interaktionen zwischen Mensch und Maschine einander gegenübergestellt.
7	Zielsystem vs. bestehende Systeme	vergleichen	Die Evaluation des Systems erfolgt stets auf Basis eines Vergleichs zu bestehenden Systemen.

Anhang C: Lastenheft

Nr.	Anforderung	Zielstellung	Erläuterung
VI	Datenhaltung/-weitergabe		
1	Datenhaltungskonzept	strukturiert, eindeutig	Relevante Prozess- und Produktinformationen werden in einer hybriden Datenhaltung aus zentralen und dezentralen Elementen bereitgestellt.
2	Aktualisierung der Daten	ermöglichen	Durch eine eindeutige und strukturierte Datenhaltung unter Vermeidung von redundanten Daten wird eine stetige Aktualität der Daten unterstützt.
3	Datenmengen in der Visualisierung	gering	Es werden lediglich die (zwingend) erforderlichen Informationen visualisiert.
4	Zusatzfunktionen der Datenhaltung	aufzeigen	In Abhängigkeit des gewählten RFID-Transponders werden die Möglichkeiten (Menge und Art) einer dezentral Datenspeicherung dargestellt.
5	Softwareschnittstellen	unabhängig	Es werden möglichst plattformunabhängige Schnittstellen verwendet.
6	Kommunikationstechnologien	standardisiert	Zur Datenübertragung werden standardisierte Kommunikationstechnologien verwendet.
VII	Flexibilität		
1	Adaptive Anpassbarkeit	gewährleisten	Das Zielsystem kann flexibel an verschiedene Montagestrukturen, Kommissioniersysteme, Lagereinrichtungen etc. angepasst werden.
2	Datenzugriff	ortsunabhängig	Die Bereitstellung von Informationen am Arbeitsplatz, in einer Lagerumgebung etc. ist nicht vom jeweiligen Ort abhängig.
3	Reaktionszeit auf kurzfristige Änderungen	gering	Bei der Veränderung von Datensätzen in der zentralen Datenhaltung ist keine Anpassung des Systems erforderlich.
4	Mitarbeiterprofile	gewährleisten	Individuelle Einstellungen von Systemparametern wird durch die Berücksichtigung von Mitarbeiterprofilen Rechnung getragen.
VIII	Kosten	gering	Die Kosten der einzelnen Systemkomponenten (HMD, Trackingsystem, Recheneinheit etc.) sind so gering wie möglich zu halten, um den Anforderungen von KMU gerecht zu werden.

Anhang D: Bewertung der Visualisierungs- und Interaktionskonzepte

Bewertung der Visualisierungskonzepte

KLARHEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
	Schriftart und -größe	5	5	5
	Strukturierung	2	4	5
	Gesamt	9	13	14

ERKENNBARKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
	Farbe	1	1	1
	Bewegung	1	1	1
	Strukturierung	2	4	5
	Schriftgrößenvariation	2	2	5
Gesamt	8	12	16	

UNTERSCHIEDBARKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Schriftgrößenvariation	3	3	5
	Strukturierung	4	4	5
	Farbe	1	1	1
	Bewegung	1	1	1
Gesamt	9	9	12	

LESBARKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Schriftart und -größe	5	5	5
	Randbereich	5	5	5
	Gesamt	10	10	10

KOMPAKTHEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
	Gesamt	2	4	4

VERSTÄNDLICHKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Verständlichkeit	3	2	2
	Gesamt	3	2	2

KONSISTENZ	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Schriftgröße	5	5	4
	Strukturierung	5	2	2
	Gesamt	10	7	6

INFORMATIONSDARSTELLUNG	Kriterium	1	2	3	4	5	6	7	Σ	Gewicht
	1 Klarheit		2	1	3	2	1	2	11	0,13
	2 Unterscheidbarkeit	2		1	3	2	1	1	10	0,12
	3 Kompaktheit	3	3		2	3	1	1	13	0,15
	4 Konsistenz	1	1	2		1	1	1	7	0,08
	5 Erkennbarkeit	2	2	1	3		1	2	11	0,13
	6 Lesbarkeit	3	3	3	3	3		3	18	0,21
	7 Verständlichkeit	2	3	3	3	2	1		14	0,17
									84	1

Anhang D: Bewertung der Visualisierungs- und Interaktionskonzepte

Grundsatz	Gewicht	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
KLARHEIT	0,13	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
		Schriftart und -größe	5	5	5
		Strukturierung	2	4	5
		SUMME	3,00	4,33	4,67
		gewichtet	0,39	0,57	0,61
UNTERSCHIED- BARKEIT	0,12	Schriftgrößenvariation	3	3	5
		Strukturierung	4	4	5
		Farbe	1	1	1
		Bewegung	1	1	1
		SUMME	2,25	2,25	3,00
		gewichtet	0,27	0,27	0,36
KOMPAKT- HEIT	0,15	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
		SUMME	2,00	4,00	4,00
		gewichtet	0,31	0,62	0,62
KONSIS- TENZ	0,08	Schriftgröße	5	5	4
		Strukturierung	5	2	2
		SUMME	5,00	3,50	3,00
		gewichtet	0,42	0,29	0,25
ERKENNBARKEIT	0,13	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
		Farbe	1	1	1
		Bewegung	1	1	1
		Strukturierung	2	4	5
		Schriftgrößenvariation	2	2	5
		SUMME	1,60	2,40	3,20
		gewichtet	0,21	0,31	0,42
LESBAR- KEIT	0,21	Schriftart und -größe	5	5	5
		Randbereich	5	5	5
		SUMME	5,00	5,00	5,00
		gewichtet	1,07	1,07	1,07
VER- STÄND- LICHKEIT	0,17	Verständlichkeit	3	2	2
		SUMME	3,00	2,00	2,00
		gewichtet	0,50	0,33	0,33
SUMME (gewichtet)			3,17	3,47	3,66

Bewertung der Interaktionskonzepte

AUFGABEN- ANGEMESSENHEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
	Form der Ein-/Ausgabe	4	5	5
	Voreinstellung typischer Eingabewerte	4	5	5
	Angepasste Dialogschritte	5	5	5
	Gesamt	15	19	19

SELBSTBE- SCHREIBUNGS- FÄHIGKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Zustandsinformation	4	2	3
	Offensichtlichkeit der Interaktion	3	2	4
	Gesamt	7	4	7

STEUERBARKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Selbstbestimmung der Interaktion	2	1	2
	Rückstellen von Eingaben	1	1	1
	der Interaktion	3	2	3

ERWARTUNGS- KONFORMITÄT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Konsistenz der Interaktion	4	4	3
	Benutzermerkmale	4	4	4
	Gesamt	8	8	7

FEHLER- TOLERANZ	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Vermeiden von Fehlern	2	2	2
	Korrekturaufwand	1	1	1
	Gesamt	3	3	3

INDIVIDUALISIER- BARKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Benutzeranpassung	2	2	2
	Gestaltungsfreiheit	1	1	1
	Gesamt	3	3	3

LERNFÖRDER- LICHKEIT	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
	Lernförderlichkeit	2	2	2
	Gesamt	2	2	2

INTERAKTION	Kriterium		1	2	3	4	5	6	7	Σ	Gewicht
	1	Aufgabenangemessenheit		2	3	3	2	3	3	16	0,19
	2	Selbstbeschreibungsfähigkeit	2		3	3	1	3	3	15	0,18
	3	Steuerbarkeit	1	1		2	1	3	3	11	0,13
	4	Erwartungskonformität	1	1	2		1	3	3	11	0,13
	5	Fehlertoleranz	2	3	3	3		3	3	17	0,20
	6	Individualisierbarkeit	1	1	1	1	1		3	8	0,10
	7	Lernförderlichkeit	1	1	1	1	1	1		6	0,07
										84	1

Anhang D: Bewertung der Visualisierungs- und Interaktionskonzepte

Grundsatz	Gewicht	Kriterium	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3
AUFGABEN- ANGEMESSENHEIT	0,19	Bedarfsgerechte Informationsbereitstellung	2	4	4
		Form der Ein-/Ausgabe	4	5	5
		Voreinstellung typischer Eingabewerte	4	5	5
		Angepasste Dialogschritte	5	5	5
		SUMME	3,75	4,75	4,75
	gewichtet	0,71	0,90	0,90	
SELBSTBE- SCHREIBUNGS- FÄHIGKEIT	0,18	Zustandsinformation	4	2	3
		Offensichtlichkeit der Interaktion	3	2	4
		SUMME	3,50	2,00	3,50
		gewichtet	0,63	0,36	0,63
STEUER- BARKEIT	0,13	Selbstbestimmung der Interaktion	2	1	2
		Rückstellen von Eingaben	1	1	1
		SUMME	1,50	1,00	1,50
		gewichtet	0,20	0,13	0,20
ER- WARTUNGS- KONFORMITÄT	0,13	Konsistenz der Interaktion	4	4	3
		Benutzermerkmale	4	4	4
		SUMME	4,00	4,00	3,50
		gewichtet	0,52	0,52	0,46
FEHLER- TOLERANZ	0,20	Vermeiden von Fehlern	2	2	2
		Korrekturaufwand	1	1	1
		SUMME	1,50	1,50	1,50
		gewichtet	0,30	0,30	0,30
IND.- BARKEIT	0,10	Benutzeranpassung	2	2	2
		Gestaltungsfreiheit	1	1	1
		SUMME	1,50	1,50	1,50
		gewichtet	0,14	0,14	0,14
LERN- FÖRDER- LICHKEIT	0,07	Lernförderlichkeit	2	2	2
		SUMME	2,00	2,00	2,00
		gewichtet	0,14	0,14	0,14
SUMME (gewichtet)			2,65	2,51	2,77

Anhang E: Fragebogen zur Evaluation



fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner
Technische Universität München

Schriftliche Befragung zur Evaluierung eines RFID-gestützten Kommissioniersystems

Die Evaluation des RFID-gestützten Kommissioniersystems wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Papierlose Produktion und Logistik“ durchgeführt. In diesem Projekt wird das Potenzial eines mobilen RFID-Lesegerätes sowie einer Datenbrille (head-mounted Display, HMD) in der Kommissionierung und Montage untersucht.

In der durchgeführten Versuchsreihe arbeiten Sie mit einem prototypenhaften Funktionsmuster, das die Möglichkeiten zur Unterstützung von Mitarbeitern in der manuellen Kommissionierung aufzeigen soll. Ziel der Versuchsreihe ist es, den Einsatz des mobilen RFID-Lesegeräts hinsichtlich möglicher Verbesserungen im Arbeitsablauf gegenüber einer Kommissionierung ohne technische Hilfsmittel zu prüfen sowie weiteres Entwicklungspotenzial der verwendeten Technik zu ermitteln.

Ihre Erfahrungen und Meinung zu der von Ihnen verwendeten Technik sind für uns sehr interessant. Daher würde es uns helfen, wenn Sie die Fragen so umfassend und so ehrlich wie möglich beantworten. Die Auswertung des Fragebogens erfolgt völlig anonym.

Vielen Dank!

Angaben zur Person

Alter: _____

Geschlecht: männlich weiblich

Muttersprache: deutsch nicht deutsch

Beruf: _____

Haben Sie Erfahrung im Bereich Kommissionieren?

keine Erfahrung etwas Erfahrung langjährige/große Erfahrung

wenn ja, mit welchen Technologien:

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

sonstige: _____



Kommissionierung ohne das mobile RFID-Lesegerät

	Stimmt genau	Stimmt weitgehend	Stimmt ein wenig	Stimmt eher nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt überhaupt nicht
Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant.	<input type="checkbox"/>					
Meine Motivation für die Tätigkeit ist gesunken.	<input type="checkbox"/>					
Die Tätigkeit machte mir wenig Spaß.	<input type="checkbox"/>					
Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung empfehlen.	<input type="checkbox"/>					

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

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

Wie anstrengend war es für Sie, sich im Kommissioniersystem zu Recht zu finden?

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

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

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

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

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

Anmerkungen/Verbesserungsvorschläge:



Kommissionierung mit dem mobilen RFID-Lesegerät

	Stimmt genau	Stimmt weitgehend	Stimmt ein wenig	Stimmt eher nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt überhaupt nicht
Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant.	<input type="checkbox"/>					
Meine Motivation für die Tätigkeit ist gesunken.	<input type="checkbox"/>					
Die Tätigkeit machte mir wenig Spaß.	<input type="checkbox"/>					
Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung empfehlen.	<input type="checkbox"/>					

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

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

Wie anstrengend war es für Sie, sich im Kommissioniersystem zu Recht zu finden?

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

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

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

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

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



	Stimmt genau	Stimmt weit- gehend	Stimmt ein wenig	Stimmt eher nicht	Stimmt weit- gehend nicht	Stimmt über- haupt nicht
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 Bedienung des Systems war eindeutig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Gehäuse des Lesegerätes störte beim Griff in das Lagerfach	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System hat meine Aktionen immer sofort erkannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Lesegerät ist für die Tätigkeit zu schwer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Gewicht des Lesegerätes würde mich bei einer ganztägigen Nutzung stören	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Handhabung war schwer zu erlernen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es war ausreichend Platz vorhanden, um auch mit dem Lesegerät die Artikel bequem zu entnehmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System reagierte auf Aktionen zu spät	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich könnte das Lesegerät auch über mehrere Stunden ohne Probleme tragen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Den Hinweis auf eine korrekte bzw. fehlerhafte Entnahme empfand ich als hilfreich	<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"/>
Beim Griff in das Lagerfach musste ich mich unnatürlich bewegen, um nicht mit dem Lesegerät am Lager anzustoßen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich konnte mich uneingeschränkt im Lager bewegen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das System beeinträchtigte meine Tätigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die akustische Rückmeldung würde mich bei der Nutzung des Systems über einen längeren Zeitraum stören	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Mit einem Display am Lesegerät könnten sämtliche Artikel direkt am Handgelenk angezeigt werden. Die Papierliste würde dadurch entfallen. Wie beurteilen Sie ein solches System im Vergleich zum Getesteten?

besser	<input type="checkbox"/>	schlechter					
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------

Am Lesegerät könnten verschiedenfarbige Leuchten über einen Fehler bzw. über eine richtige Entnahme informieren (bspw. über ein Ampelsystem). Dadurch würde die akustische Rückmeldung entfallen. Wie beurteilen Sie ein solches System im Vergleich zum Getesteten?

besser	<input type="checkbox"/>	schlechter					
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------

Zur Reduzierung des Gewichts am Handgelenk könnten einzelne Komponenten an den Körper verlegt werden (z. B. an den Gürtel, in die Jackentasche etc.). Dazu sind jedoch ein Kabel zum Handgelenk und ein Kleidungsstück zur Führung des Kabels notwendig. Wie beurteilen Sie ein solches System im Vergleich zum Getesteten?

besser	<input type="checkbox"/>	schlechter					
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------

Können Sie sich vorstellen, dass ein solches System in naher Zukunft (weniger als 5 Jahre) im industriellen Umfeld eingesetzt wird?

sicher	<input type="checkbox"/>	nicht vorstellbar					
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------

Anmerkungen/Verbesserungsvorschläge:
