

Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik
der Technischen Universität München

Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems

Dipl.-Ing. (Univ.) Rupert Reif

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
2. Univ.-Prof. Gudrun Klinker, Ph.D.

Die Dissertation wurde am 09.03.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 22.06.2009 angenommen.

Rupert Reif

Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems

Geh nicht immer auf dem vorgezeichneten Weg,
der nur dahin führt, wo andere bereits gegangen sind.

(Alexander Graham Bell)

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

Technische Universität München

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, TU München, 2009

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.

Layout und Satz: Rupert Reif

Copyright © Rupert Reif 2009

ISBN: 978-3-941702-04-2

Printed in Germany 2009

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der TU München und basiert auf meiner Mitarbeit am Projekt „Pick-by-Vision – Augmented Reality unterstützte Kommissionierung“ und am Teilprojekt „Mitarbeiterqualifizierung und –mobilität (Mit-Log)“ des Forschungsverbundes „Supra-adaptive Logistiksysteme (ForLog)“.

Ich möchte mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml herzlich für das angenehme Arbeitsumfeld und die Hilfe in den letzten Jahren bedanken. Mein besonderer Dank gilt dabei Frau Dr.-Ing. Julia Boppert, Herrn Dr.-Ing. Michael Schedlbauer, Herrn Dennis Walch sowie Herrn Dr.-Ing. Johannes Wulz, die mich bei meiner Forschungstätigkeit sowie durch ihren Rat und Tat bei der Erstellung dieser Arbeit bestmöglich unterstützten. Recht herzlich möchte ich mich bei Herrn Björn Schwerdtfeger vom Fachgebiet Augmented Reality (FAR) der TU München bedanken, der mit seinen guten Ideen und seiner unermüdlichen Arbeit wesentlich zum Erfolg des in dieser Arbeit entwickelten Augmented Reality (AR) unterstützten Kommissioniersystems beitrug. Des Weiteren möchte ich mich bei allen Industriepartnern bedanken. Ein abschließender Dank gilt allen Studenten und Probanden, die an der Entwicklung und Evaluierung beteiligt waren.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh möchte ich mich für den Vorsitz der Prüfungskommission bedanken. Frau Prof. Gudrun Klinker, Ph.D. gilt mein ganz besonderer Dank nicht nur für die Übernahme des Koreferats, sondern auch für die Unterstützung bei der Entwicklung des AR unterstützten Kommissioniersystems durch das FAR. Recht herzlich möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner bedanken, der die Arbeit von Anfang an unterstützte, mir meine Freiheiten bei der Forschungstätigkeit gewährte und mir bei Fragen stets behilflich war.

Bei Theresa Karpfinger bedanke ich mich nicht nur für das Korrekturlesen, sondern auch für ihre verständnis- und liebevolle Art der Unterstützung. Der größte Dank gilt meinen Eltern, Christa und Rupert Reif, die mich während meiner gesamten Ausbildung bestmöglich förderten und unterstützten. Diese Arbeit sei Euch gewidmet.

Kurzzusammenfassung

Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems

Rupert Reif

Beim Einsatz der Augmented Reality Technologie in der Kommissionierung trägt der Kommissionierer eine Datenbrille und ein Trackingsystem erfasst seine Position und Blickrichtung (Pick-by-Vision). Dadurch können neben allen für seine Tätigkeit wichtigen Informationen auch lagerichtig im Raum positionierte Objekte, wie z.B. ein Rahmen um das aktuelle Lagerfach, direkt in seinem Blickfeld angeordnet werden.

Für die konventionelle Kommissionierung nach dem Prinzip Mann-zur-Ware erfolgte anhand von Anforderungen an ein derartiges System die Auswahl der Systemkomponenten und die Erstellung der Benutzerschnittstelle. In einem Labortest wurde das System evaluiert, indem eine Variante mit Tracking, eine ohne Tracking und eine Papierliste verglichen wurden. Beide Systeme mit Datenbrille wiesen eine sehr steile Lernkurve sowie eine geringe Fehlerquote auf und führten bei den Probanden zu keiner erhöhten subjektiven Beanspruchung.

Summary

Development and Evaluation of an Augmented Reality Order Picking System

Rupert Reif

Using the Augmented Reality technology in order picking, the worker wears a head-mounted display and his position and line of sight are measured by a tracking system (Pick-by-Vision). Thus, besides the important information for his work, 3D-objects in the right spatial position - like a frame around the current storing location - can also be displayed in his field of view.

For conventional order picking (man-to-goods principle) the system components were selected and the user interface was created following the requirements for such a system. The system was evaluated in a laboratory test comparing a variant with tracking, one without tracking and a paper list. Both systems with head-mounted displays showed a steep learning curve as well as a low error rate and do not led to a higher subjective demand within the subjects.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.1	Situationsanalyse	1
1.2	Motivation zu dieser Arbeit	4
1.3	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2	Grundlagen der Kommissionierung	10
2.1	Definitionen und Begrifflichkeiten	10
2.2	Erfolgsfaktoren in der Kommissionierung	11
2.2.1	Kommissionierkosten	11
2.2.2	Kommissionierqualität	12
2.2.3	Kommissionierzeit	15
2.2.4	Flexibilität	20
2.3	Anforderungen an ein Kommissioniersystem	21
2.4	Der Mensch in der Kommissionierung	22
2.4.1	Unersetzlichkeit des Menschen	22
2.4.2	Einflussfaktoren auf den Menschen	23
2.5	Aufbau von Kommissioniersystemen	26
2.5.1	Organisationssystem	27
2.5.2	Materialflusssystem	29
2.5.3	Informationssystem	32
2.6	Informationsbereitstellungstechnologien	34
2.6.1	Papiergebundene Informationsbereitstellung	35
2.6.2	Papierlose Informationsbereitstellung	36
2.6.2.1	Mobile Datenterminals	36
2.6.2.2	Pick-by-Light	37
2.6.2.3	Put-to-Light	39
2.6.2.4	Pick-by-Voice	39
2.6.3	Gegenüberstellung der Informationsbereitstellungstechniken	41
3	Stand der Technik zur Augmented Reality	44
3.1	Definition Augmented Reality	44
3.1.1	Definition zur Virtual Reality	44
3.1.2	Begriffsdefinition Augmented Reality	45
3.1.3	Gegenüberstellung von Augmented und Virtual Reality	47
3.1.4	Potenziale von Augmented Reality	49
3.2	Funktionsprinzip und Aufbau eines AR-Systems	50

3.2.1	Visualisierungsmedien	52
3.2.1.1	Einteilung.....	52
3.2.1.2	Datenbrillen	54
3.2.2	Trackingsystem	65
3.2.2.1	Definition.....	65
3.2.2.2	Anforderungen.....	67
3.2.2.3	Grundprinzipien	69
3.2.2.4	Hybride Verfahren	74
3.2.3	Szenengenerator und Datenhaltungssystem	75
3.2.4	Interaktionssystem	77
3.2.4.1	Anforderungen aus Sicht der Augmented Reality.....	77
3.2.4.2	Eingabegeräte und Interaktionsmetaphern.....	78
3.3	Einsatzbereiche im industriellen Umfeld.....	80
3.3.1	Produktentwicklung	81
3.3.2	Produktionsplanung	82
3.3.3	Produktion und Montage	84
3.3.4	Qualitätssicherung	86
3.3.5	Instandhaltung und Service.....	87
3.3.6	Schulung	88
3.3.7	Kommissionierung.....	88
3.4	Zusammenfassung der Einsatzbereiche	91
4	Potenziale und Einsatzbereiche der AR-Kommissionierung.....	94
4.1	Potenziale	94
4.1.1	Für den AR-Einsatz geeignete Aufgaben.....	94
4.1.2	Potenziale in der Kommissionierung	96
4.2	Einsatzbereiche.....	98
4.2.1	Arten der AR-Unterstützung in der Kommissionierung.....	99
4.2.2	Einflussfaktoren auf den Einsatz von Pick-by-Vision.....	102
4.2.3	Mögliche Einsatzszenarien von Pick-by-Vision	108
4.2.3.1	Szenario 1: Konventionelles Kommissionieren.....	110
4.2.3.2	Szenario 2: Kommissionierung entlang einer Regalzeile.....	112
4.2.3.3	Szenario 3: Kommissioniernest	113
4.2.3.4	Szenario 4: Stationärer Kommissionierarbeitsplatz	114
5	Anforderungen an ein AR-Kommissioniersystem.....	117
5.1	Kommissionierung.....	117
5.2	Hardware.....	120
5.2.1	Mobiler Rechner.....	120
5.2.2	Datenbrille	120

5.2.3	Trackingsystem	125
5.2.4	Interaktionsgerät	128
5.3	Software	129
5.3.1	Visualisierung	130
5.3.2	Interaktion	131
5.4	Mensch.....	132
6	Konzeption und Systementwurf.....	135
6.1	Betrachteter Kommissionierprozess.....	135
6.2	Datenbrille	136
6.2.1	Bewertung verfügbarerer monokularer Datenbrillen.....	136
6.2.2	Ausgewählte Datenbrille	139
6.3	Trackingsystem	140
6.3.1	Bewertung verfügbarer Trackingverfahren	141
6.3.2	Trackingverfahren für die Kommissionierung	142
6.3.2.1	Optisches inside-out Tracking	142
6.3.2.2	Optisches outside-in Tracking	145
6.3.2.3	Zusammenfassung der Einsatzszenarien.....	147
6.4	Interaktionsgerät.....	149
6.4.1	Interaktionsgeräte für die AR-Kommissionierung	149
6.4.2	Auswahl des Interaktionsgeräts	152
6.5	Interaktionskonzept	153
6.5.1	Benutzeroberfläche	154
6.5.1.1	Allgemeine Regeln für die GUI-Gestaltung mit AR	154
6.5.1.2	GUI-Gestaltung für das Nomad	155
6.5.1.3	Metapher zur Blickführung.....	158
6.5.1.4	Metapher zur Wegfindung	159
6.5.1.5	Metapher zur Lagerfachfindung.....	161
6.5.1.6	Bewertung der Visualisierungen	161
6.5.2	Interaktionskonzept	162
6.6	Systemaufbau	164
7	Evaluierung in einem Labortest.....	167
7.1	Voruntersuchungen	167
7.1.1	Feldstudien vs. Laboruntersuchungen	167
7.1.2	Usability Testing.....	168
7.2	Versuchsaufbau	169
7.2.1	Kommissioniersystem	170
7.2.2	Kommissioniertechnologien	173
7.2.2.1	Kommissionierliste.....	173

7.2.2.2	Pick-by-Vision mit Tracking	174
7.2.2.3	Pick-by-Vision ohne Tracking	175
7.2.3	Zu messende abhängige Variablen.....	176
7.2.3.1	Logistische Kennzahlen.....	177
7.2.3.2	Subjektive Beanspruchung.....	177
7.2.4	Untersuchungsziele.....	180
7.3	Versuchsdurchführung	184
7.4	Auswertung	186
7.4.1	Probanden	187
7.4.2	Kommissionierfehler.....	188
7.4.3	Kommissionierzeit.....	194
7.4.4	Subjektive Beanspruchung	201
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluierung.....	210
8	Technisch-wirtschaftliche Bewertung.....	214
8.1	Vergleich durch MTM-Analyse	214
8.2	Wirtschaftliche Analyse	218
9	Zusammenfassung und Ausblick	221
9.1	Zusammenfassung.....	221
9.2	Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.....	222
10	Literaturverzeichnis.....	225
Anhang	250

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Die Globalisierung und die Individualisierung als Einflussfaktoren auf die Logistik; Wie sich darauf der Klimawandel auswirkt, bleibt abzuwarten und wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.	2
Abbildung 1-2: Pick-by-Vision im Spannungsfeld zwischen der Kommissionieraufgabe, der AR-Technologie und dem Menschen.....	7
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit und Zusammenhang der neun Kapitel.....	8
Abbildung 2-1: Aus dem magischen Dreieck wird das magische Viereck der Logistik	11
Abbildung 2-2: Anteil der Kommissionierung an den Gesamtkosten	12
Abbildung 2-3: Arten und Anteil von Kommissionierfehlern (u. a. nach [Men-99])....	13
Abbildung 2-4: Veränderung der Kommissionierzeitanteile (nach [Lün-05]).....	18
Abbildung 2-5: Saisonale Schwankungen	20
Abbildung 2-6: Tagesschwankungen.....	20
Abbildung 2-7: Das Kommissioniersystem als Arbeitssystem (nach [DIN6385])	26
Abbildung 2-8: Einteilung des Organisationssystems (nach [VDI3590]).....	28
Abbildung 2-9: Einteilung des Materialflusssystems (nach [VDI3590]).....	31
Abbildung 2-10: Einteilung des Informationssystems (nach [VDI3590])	33
Abbildung 2-11: Arten der Informationsbereitstellung	34
Abbildung 3-1: Die drei I's der Augmented Reality	46
Abbildung 3-2: Reality-Virtuality-Continuum (nach [Mil-94])	47
Abbildung 3-3: Gartner Hype Cycle für kommende Technologien [Gar-08].....	49
Abbildung 3-4: Aufbau eines AR-Systems.....	50
Abbildung 3-5: Einteilung von Visualisierungsmedien für AR mit der Hervorhebung der für diese Arbeit betrachteten Datenbrillen	53
Abbildung 3-6: Einteilung der Datenbrillen nach Okularität	57
Abbildung 3-7: FoVD und FoVE in Abhängigkeit der Bauart	60
Abbildung 3-8: OST	61
Abbildung 3-9: VST	61
Abbildung 3-10: Aufbau eines Trackingsystems.....	66
Abbildung 3-11: Outside-in, Inside-out und inside-in Tracking.....	67
Abbildung 3-12: Passive Targets für IR-Systeme (links) und Videosysteme (Mitte) oder aktives Target mit LED (rechts).....	73
Abbildung 3-13: Erzeugung einer Verdeckung eines virtuellen Objekts durch ein reales	76
Abbildung 3-14: Tangible Interface: das virtuelle Menü wird über einen speziellen Papiermarker bedient (rechts oben, gekennzeichnet durch eine virtuelle Kugel)	79

Abbildung 4-1: Abhängigkeit des Grades der AR-Unterstützung von der Komplexität der Arbeitsaufgabe und der Erfahrung des Mitarbeiters).....	96
Abbildung 4-2: Kommissionierprozess mit Ansatzpunkten für den AR-Einsatz	100
Abbildung 4-3: Arten der AR-Unterstützung in der Kommissionierung	101
Abbildung 4-4: Aufteilung des Materialflusssystem und für den Einsatz von Pick-by-Vision geeignete Materialflusstypen	107
Abbildung 4-5: Konventionelles Kommissionieren mit einem Schnelldreherbereich auf Paletten und einem Fachbodenregallager für Langsamdreher.....	111
Abbildung 4-6: Kommissionierung entlang einer Regalzeile.....	112
Abbildung 4-7: Kommissioniernest	114
Abbildung 4-8: Stationärerer Kommissionierarbeitsplatz	115
Abbildung 5-1: Schwerpunktlage im Stehen und beim Bücken	125
Abbildung 5-2: Statischer Fehler (Genauigkeit)	126
Abbildung 5-3: Dynamischer Fehler (Latenzzeit).....	126
Abbildung 5-4: Unterschiedliches Modell von Entwickler und Benutzer (nach [Nor-02])	132
Abbildung 6-1: Prozess für paralleles, konventionelles Kommissionieren mehrerer Aufträge.....	136
Abbildung 6-2: Funktionsweise eines VRD (nach [Vii-98])	139
Abbildung 6-3: Kommissionierer mit einem inside-out-System.....	143
Abbildung 6-4: Groborientierung an großem Marker, Feinorientierung an kleinem Marker	143
Abbildung 6-5: Kommissionierwagen mit Marker.....	145
Abbildung 6-6: Kommissionierwagen mit IR-Target.....	145
Abbildung 6-7: Funktionsweise von outside-in IR-Trackingsystemen.....	146
Abbildung 6-8: Papiermarkerbasiertes inside-out Tracking in Szenario 1	147
Abbildung 6-9: IR outside-in Tracking für Szenario 4 mit fest definierter Position der Sammelbehälter (Rahmen um die Palette).....	148
Abbildung 6-10: Dreh-/Drückknopf [Gri-08].....	151
Abbildung 6-11: Mini Click auf dem mobilen Rechner des Nomad	151
Abbildung 6-12: Fingerscanner [Sym-08]	152
Abbildung 6-13: Ringmouse [Cio-07].....	152
Abbildung 6-14: Generelle Aufteilung der Daten in Inhalt und Navigation bei der Darstellung mit einem HMD [Beu-04]	156
Abbildung 6-15: „Gummiband“-Metapher mit Pfeil [ScB-07a]	159
Abbildung 6-16: Tunnel zur Blickführung [Bio-06].....	159
Abbildung 6-17: 2D-Karte mit allen Positionen, farblich nach Bearbeitungsstatus gekennzeichnet, sowie dem Weg durch das Lager	160
Abbildung 6-18: GUI Einteilung des FoVD	163
Abbildung 6-19: Mögliche GUI (nur Textinformationen) während der Entnahme....	163

Abbildung 6-20: Hardwareaufbau mit den beiden möglichen Trackingtechnologien	165
Abbildung 6-21: Trackingkameras über dem Lagerbereich	166
Abbildung 6-22: HMD mit Trackingkugeln	166
Abbildung 7-1: Versuchsumgebung.....	171
Abbildung 7-2: Papierliste zum Auftrag 6	174
Abbildung 7-3: Umgesetzter Kommissionierprozess im Labortest.....	175
Abbildung 7-4: Hauptmenü für beide Pick-by-Vision-Techniken.....	176
Abbildung 7-5: System mit Tracking (Tunnel, Rahmen um Lagerfachbeschriftung)	176
Abbildung 7-6: System ohne Tracking (Angabe einer Position).....	176
Abbildung 7-7: Versuchsablauf für einen Probanden	185
Abbildung 7-8: Kommissionierfehlerquote (Mittelwert und Standardabweichung über alle Probanden)	188
Abbildung 7-9: Einteilung aller Kommissionierfehler nach Fehlerart.....	190
Abbildung 7-10: Anzahl Kommissionierfehler pro Proband.....	190
Abbildung 7-11: Kommissionierfehlerquote (ohne systematische Fehler)	191
Abbildung 7-12: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der 3D-Erfahrung der Probanden.....	192
Abbildung 7-13: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der Kommissioniererfahrung der Probanden	193
Abbildung 7-14: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der Technik und der Reihenfolge	194
Abbildung 7-15: Kommissionierzeiten (Mittelwert und Standardabweichung über alle Probanden).....	195
Abbildung 7-16: Einzelzeiten der Probanden (beginnend mit dem kumulativ langsamsten Probanden)	196
Abbildung 7-17: Boxplot zur Kommissionierzeit über alle Probanden (Boxplot nach [Tuc-77]).....	197
Abbildung 7-18: Kommissionierzeit in Abhängigkeit der 3D-Erfahrung der Probanden (Mittelwerte und Standardabweichung)	198
Abbildung 7-19: Kommissionierzeit in Abhängigkeit der Kommissioniererfahrung der Probanden (Mittelwerte und Standardabweichung).....	199
Abbildung 7-20: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der Technik und der Reihenfolge	200
Abbildung 7-21: Mentale Beanspruchung (Mittelwert und Standardabweichung)...	201
Abbildung 7-22: Mentale Beanspruchung in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Mittelwerte und Standardabweichung)	203
Abbildung 7-23: Mentale Beanspruchung mit den einzelnen Techniken in Abhängigkeit der Reihenfolge der Techniken.....	204
Abbildung 7-24: Konzentration in Abhängigkeit der Durchgänge	205
Abbildung 7-25: Konzentration in Abhängigkeit der Uhrzeit	205

Abbildung 7-26: Fehleranzahl im d2-Test in Abhängigkeit der Technik und des Durchgangs	205
Abbildung 7-27: Zusammenhang zwischen Konzentration und Kommissionierfehler	206
Abbildung 7-28: Einschätzung der Verdeckung durch die Probanden.....	207
Abbildung 7-29: Beschwerden der Probanden	208
Abbildung 7-30: Mit welcher Methode würden sie am liebsten arbeiten?	208
Abbildung 7-31: Mit welcher Methode würden sie länger arbeiten wollen?	209
Abbildung 7-32: Mit welcher Methode hatten sie ihrer Meinung nach die beste Zeit?	209
Abbildung 7-33: Zusammenhang Kommissionierfehler und Kommissionierzeit	212
Abbildung 8-1: Zugrundeliegendes Layout für die MTM-Analyse für den dritten Auftrag bei der Papierliste	215
Abbildung 8-2: Einmalige und laufende Kosten für die Einführung eines AR-Systems in der Kommissionierung (nach [Fri-04]).....	220

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Fehlerquoten für verschiedene Informationsbereitstellungstechniken ..	42
Tabelle 3-1: Vergleich von VR und AR	48
Tabelle 3-2: Vergleich von OST und VST	62
Tabelle 3-3: Übersicht über industrielle AR-Anwendungen (mono = monokular, bino = binokular, LA = Look-Around HMD, Marker = optisches Videotracking, L/P = praxisnaher Einsatz).....	93
Tabelle 4-1: Potenziale des AR-Einsatzes in der Kommissionierung (PL = Papierliste)	97
Tabelle 4-2: Einflussfaktoren auf die Auslegung eines Kommissioniersystems.....	98
Tabelle 4-3: Eignung von bestimmten Lagertypen für Pick-by-Vision.....	104
Tabelle 4-4: Einflussfaktoren auf den Einsatz von Pick-by-Vision hinsichtlich des Kommissioniersystems (Gliederung nach [VDI3590])	108
Tabelle 4-5: Übersicht über mögliche Einsatzszenarien von Pick-by-Vision	109
Tabelle 5-1: Anforderungen aus Sicht des Kommissionierprozesses	117
Tabelle 5-2: Anforderungen an die Datenbrille	125
Tabelle 5-3: Anforderungen an das Trackingsystem	128
Tabelle 5-4: Anforderungen an das Interaktionsgerät.....	129
Tabelle 5-5: Anforderung an die Visualisierung	131
Tabelle 5-6: Anforderung an die Interaktion.....	131
Tabelle 5-7: Anforderungen aus menschlicher Sicht	134
Tabelle 6-1: Betrachtete Datenbrillen	137
Tabelle 6-2: Bewertung der Datenbrillen	138
Tabelle 6-3: Vergleich von Trackingverfahren	142
Tabelle 6-4: Zusammenfassung der möglichen Trackingverfahren	149
Tabelle 6-5: Bewertung der Eingabegeräte hinsichtlich der Anforderungen	153
Tabelle 6-6: Zusammenfassung der verschiedenen Visualisierungen in bisherigen Untersuchungen zur AR-Kommissionierung.....	161
Tabelle 7-1: Auftragsstruktur	172
Tabelle 7-2: Probandenstruktur	187
Tabelle 7-3: Varianzanalyse zu den Kommissionierzeiten	195
Tabelle 7-4: Varianzanalyse zur Abhängigkeit der Kommissionierzeit von der Reihenfolge der Technik.....	200
Tabelle 7-5: ANOVA zur mentalen Beanspruchung der Techniken.....	202
Tabelle 7-6: ANOVA zur mentalen Beanspruchung über die Versuchsdauer	202
Tabelle 7-7: MANOVA zur mentalen Beanspruchung in Abhängigkeit der Reihenfolge der Techniken.....	203
Tabelle 7-8: Zusammenfassung der Kommissionierfehler.....	211

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-9: Zusammenfassung der Kommissionierzeit	212
Tabelle 7-10: Einfluss auf die subjektive Beanspruchung	213
Tabelle 8-1: Vergleich der drei Technologien mit MTM-1	217

Formelverzeichnis

Formel 2-1: Berechnung der Fehlerquote.....	14
Formel 2-2: Berechnung der Kommissionierzeit für einen Auftrag mit n Positionen .	16
Formel 2-3: Berechnung der Kommissionierleistung	19
Formel 3-1: Berechnung des FoVD für monokulare HMDs [Mel-97]	60
Formel 3-2: Berechnung der Auflösung eines HMDs	63
Formel 6-1: Berechnung der erforderlichen Zeichenhöhe ([DIN9241] Teil 3)	157
Formel 6-2: Berechnung der erforderlichen Strichbreite (nach [DIN9241] Teil 3)...	158

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
CAD	Computer Aided Design
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
COS	Koordinatensystem
CRT	Cathode Ray Tube
DLZ	Durchlaufzeit
DPS	Dynamic Picking System
EDI	Electronic Data Interchange
EE	Entnahmeeinheit
FAR	Fachgebiet für Augmented Reality
FoV	Field of View
FoVD	Field of View Display
FoVE	Field of View Environment
FTS	Fahrerloses Transport System
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HITL	Human Interface Technology Laboratory
HMD	Head-mounted Display
HUD	Head-up Display
IR	Infrarot
KLT	Kleinladungsträger
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
LCD	Liquid Crystal Display
LDL	Logistikdienstleister
LED	Light Emitting Diode
Lehrstuhl fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
LHM	Ladehilfsmittel
MANOVA	Multivariate Analysis of Variance
MDT	Mobiles Datenterminal
MR	Mixed Reality
MTM	Methods-Time Measurement
mTr	(Pick-by-Vision) mit Tracking

MzW	Mann-zur-Ware
OST	Optical-See-Through
oTr	(Pick-by-Vision) ohne Tracking
PbL	Pick-by-Light
PbV	Pick-by-Voice
PL	Papierliste
Pos	Position
QS	Qualitätssicherung
RBG	Regalbediengerät
RFID	Radio Frequency Identification
RV	Reality-Vistuality (Continuum)
TFT	Thin Film Transistor
TLX	Task Load Index
UI	User Interface
UMPC	Ultra Mobile PC
UWB	Ultra Wideband
VRD	Virtual Retinal Display
VST	Video-See-Through
WIMP	Windows Icons Menus Pointer
WLAN	Wireless Local Area Network
WMS	Warehouse Management System
WzM	Ware-zum-Mann
XML	Extensible Markup Language

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Für den anhaltenden Wandel in der Wirtschaft stehen seit 20 Jahren besonders zwei Begriffe: Globalisierung und Individualisierung. Ein dritter Trend, der die Entwicklung der Menschheit in den nächsten Jahren prägen wird, ist die Ökologie, die unter Schlagworten wie Green IT oder Green Logistics auftritt.

1.1 Situationsanalyse

In Zeiten der Finanzkrise wird die Globalisierung für viele Fehlentwicklungen verantwortlich gemacht. Sie stellt die Wirtschaft vor viele neue Herausforderungen, aber ebenso eröffnet sie neue Chancen. Der Sprecher des Forums Intralogistik C. Hahn-Woernle vergleicht die Globalisierung mit einem Kartenspiel: „man muss schauen, was man auf der Hand hat und was man aus diesem Spiel machen kann“ [Wes-08]. Eine Tatsache ist, dass die Globalisierung u. a. den Weg vom Anbieter- über den Käufer- hin zum Individualmarkt bereitete [Gün-04]. Möglichst kundenindividuelle Produkte und eine Diversifizierung stellen für die Unternehmen Differenzierungsmerkmale dar, um die Kundenbedürfnisse im weltweiten Verdrängungswettbewerb optimal und wirtschaftlich zu erfüllen. Diese Variantenvielfalt führt zur Build-to-Order Produktion und zu einer steigende Komplexität im Produktions- und Logistiknetzwerk [Voi-07b]. Beispielsweise sind heute Premiumfahrzeuge in 10^{16} möglichen Ausstattungsvarianten verfügbar, bestehen aus 18.000 bis 20.000 Einzelteilen und werden in bis zu zehn weltweit verteilten Fertigungsstufen produziert [Bop-08]. Neben der Individualisierung von Produkten und Leistungen ist eine sinkende Kundenloyalität zu beobachten [Str-05], was durch das Internet weiter verstärkt wird. Das Web 2.0 bezieht den Benutzer noch mehr ein, steigert den Internethandel und fördert die individuelle Produktnachfrage bei einem gestiegenen Preisbewusstsein [Gün-07]. Steigende Nachfrageschwankungen und sinkende Liefer- und Prozesszeiten sind die Folgen. Einerseits ist Flexibilität die oberste Devise, um auf die schwankende Nachfrage und sich kurzfristig ergebende Markttrends zu reagieren. Andererseits müssen die Auftragsdurchlaufzeiten eingehalten werden, weil die Lieferzeit ein verkaufsentcheidendes Kriterium ist.



Abbildung 1-1: Die Globalisierung und die Individualisierung als Einflussfaktoren auf die Logistik; Wie sich darauf der Klimawandel auswirkt, bleibt abzuwarten und wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Aufgrund der immer komplexeren Prozesse und Produkte beschränken sich viele Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen und lagern ganze Unternehmensbereiche aus. Beispielsweise ist die Eigenfertigungstiefe der deutschen Fahrzeughersteller auf 25 % abgesunken. Die Trennung von personalintensiver Produktion und Markt aufgrund des Lohngefälles führt nicht nur zu einem erhöhten logistischen Aufwand vom Billiglohn- ins Industrieland, sondern auch umgekehrt, weil aufgrund der gestärkten Kaufkraft in den Billiglohnländern die Nachfrage nach hochwertigen Gütern aus den Industrieländern steigt ([Bau-08], [Gün-07]). Der Stellenwert aber auch der Anspruch an die Logistik als Bindeglied zwischen den Partnern in weltweiten Netzwerken nimmt damit weiter zu. Heutige wie zukünftige Anforderungen gilt es rechtzeitig, vollständig und fehlerfrei zu erkennen (siehe Abbildung 1-1). Sind diese Anforderung erfüllt, wird die Logistik ein wichtiger oder sogar entscheidender „Strategy-Enabler“ [Rin-07]. Seit 2006 wächst die Logistikwirtschaft am Standort Deutschland stärker als das Bruttoinlandsprodukt [Kla-08]. Der Logistikmarkt umfasste 2007 in der Europä-

ischen Union (inkl. Norwegen und der Schweiz) 900 Mrd. €; 205 Mrd. € entfielen auf den größten Logistikmarkt Deutschland. Davon sind 25 % auf Lagerkosten zurückzuführen. Die Logistikwirtschaft beschäftigte 2007 2,67 Mio. Menschen direkt und 0,7 Mio. bei Zulieferern. Aufgrund der aktuellen Wirtschaftskrise sind Prognosen für die Zukunft schwierig.

Genau wie die externe Logistik gehört laut C. Hahn-Woernle die Intralogistik zu den Globalisierungsgewinnern [Wes-08]. „Die Intralogistik umfasst die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen“ [GüP-06]. In der Intralogistik liegen die größten erschließbaren Effizienzpotenziale für Unternehmen, die ihre Logistik weiter optimieren möchten. Die Intralogistik als Herzstück der Supply Chain bestimmt, was die Supply Chain kann [Mie-06]. Die Intralogistikbranche erzielte im Jahr 2008 einen Umsatz von 19,4 Mrd. € und damit trotz beginnender Wirtschaftskrise 9 % mehr als 2007 [VDMA-09]. Der Exportanteil betrug 50 %. Von 2003 bis 2008 ist die Branche damit um 50 % gewachsen. Die schlechte gesamtwirtschaftliche Lage wird auch die Intralogistikbranche treffen, so dass ein Umsatzrückgang von 8 % für 2009 erwartet wird.

Die Kommissionierung als einer der wichtigsten Prozessschritte der Intralogistik hat durch breitere Artikelspektren, kundenfreundliche Konfektionierung und den Versandhandel in den letzten Jahrzehnten stetig an Bedeutung gewonnen [Gün-07]. Diese kundenauftragsbezogene Zusammenstellung von Gütern ist an vielen Stellen Bestandteil der unternehmensinternen logistischen Kette zwischen Wareneingang und Warenausgang. Kommissionierfehler betreffen interne wie externe Kunden-Lieferantenbeziehungen und führen zur Beeinträchtigung der Produktion und der Kundenzufriedenheit. Lange Zeit waren der Mengenaspekt und die Optimierung hinsichtlich Zeit und Kosten wichtig, nun wird der Qualitätsaspekt als wichtiges Differenzierungsmerkmal zur Erreichung der Kundenzufriedenheit immer bedeutender. Ein großes Potenzial zur wirtschaftlichen Optimierung von Kommissioniersystemen liegt in der Gestaltung der Kommissionierarbeitssysteme und der Arbeitsabläufe [Lol-03]. Seit den 1980er Jahren sind die Güter aus größer werdenden Gesamtmengen in kleineren und flexibleren Sendungsgrößen immer mehr Kunden bereitzustellen, wobei in Deutschland die Atomisierung der Liefergrößen nahezu abgeschlossen ist ([MaH-94], [Mie-06]). Dies führte zu einer steigenden Komplexität der Kommissionie-

raufgabe (Auftragsgrößen und Durchlaufzeiten sinken, Durchsätze erhöhen sich) und bedingte den Einsatz neuer Technologien wie Barcodes, belegloser Kommissionierung (Mobile Datenterminals, Pick-by-Light), Schachtkommissionierern, PC und Lagerverwaltungssystemen. Seit Beginn der 1990er Jahre wird vermehrt versucht zu automatisieren (Robotereinsatz). Obwohl es einzelne aufsehenerregende Umsetzungen gibt, ist die Automatisierung meistens aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht einsetzbar [Gün-07]. Automatisierte Lösungen sind zu starr und müssen auf Spitzenbelastung ausgelegt werden. Sie sind überdimensioniert und stehen den größten Teil des Jahres still [Wal-08]. 48 % aller Logistikprozesse werden manuell betrieben, in der Kommissionierung beträgt der Automatisierungsgrad nur 25 %. Vor allem Logistikdienstleister (LDL) mit kurzem und häufig wechselndem Aufgabenfeld können Kostenvorteile automatischer Systeme nicht nutzen (nur 15% Automatisierungsgrad in der Kommissionierung) [Str-05]. In den letzten Jahren hat Pick-by-Voice seine Reife erlangt und führt für bestimmte Artikel- und Auftragsstruktur zu höherer Pickleistung bei geringeren Fehlern [Gün-07].

1.2 Motivation zu dieser Arbeit

Trotz aller Rationalisierungsbestrebungen nimmt der Mensch nach wie vor eine zentrale Rolle in der Logistik ein und prägt die Leistungsfähigkeit eines logistischen Systems. Der Mensch ist in den meisten Fällen nicht durch Maschinen ersetzbar, weil seine kognitiven Fähigkeiten sowie sein Tast- und Greifvermögen nicht betriebswirtschaftlich vertretbar auf Maschinen übertragbar sind [Arn-05]. Wegen der universell einsetzbaren Kombination aus Hand und Auge [Buc-05] wird der Mensch auch in den nächsten Jahren das Kernelement beim Kommissionieren bleiben [Dul-05]. Der Mitarbeiter muss sich auf ständig wechselnde Arbeitsplätze an einem Standort oder standortübergreifend einstellen und sich fortlaufend auf neue Arbeitssituationen einstellen. Dies gilt sowohl für unternehmenseigene Beschäftigte als auch für Leiharbeiter, die im Lager kurzfristig 80 bis 90 % der Belegschaft ausmachen können [Gil-08]. Um die Einarbeitungszeit zu minimieren und eine effizientere und fehlerfreie Ausführung der Arbeitsaufgabe zu ermöglichen, muss der Kommissionierer durch neue Methoden der Bereitstellung von Handlungsinformationen unterstützt werden [ScB-07a]. In einem Hochlohnland wie Deutschland gilt es, qualifizierte Arbeitskräfte durch eine optimale und durchdachte technische wie informationstechnologische Unterstützung

effizienter arbeiten zu lassen [Mie-06]. Auf der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle¹ sollte dabei ein besonderes Augenmerk liegen, wobei die Aufgaben hinsichtlich der jeweiligen Fähigkeiten bestmöglich zu verteilen sind. Während die Maschine schnellere und exaktere Rechenprozesse vorweist, verfügt der Mensch über eine hohe körperliche und geistige Flexibilität [Alt-03]. Eine technische Unterstützung ist nicht nur für physische Tätigkeiten, sondern auch für psychische Aufgaben nötig, weil die menschliche Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen begrenzt ist.

In der Kommissionierung nehmen Totzeiten 20 bis 30 % der gesamten Kommissionierzeit ein [Alt-03], 10 % wird nur für die Suche nach Bauteilen verwendet [VW-03]. Die Augmented Reality (AR, Erweiterte Realität) kann Menschen als ein sich v. a. optisch orientierendes Wesen [HeV-06] bei der Erfüllung seiner Aufgaben unterstützen. AR ist die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung um künstliche, vom Rechner generierte Informationen. Dieser Technologie werden Potenziale in der Logistik zugesagt, die Planungsaufgaben und die Unterstützung operativer logistischer Prozesse betreffen [Gün-04]. AR in der Kommissionierung hat ein großes Innovationspotenzial für die Zukunft [Fra-04]. Dem Kommissionierer werden alle für seine Tätigkeit benötigten Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort über eine Datenbrille angezeigt. Viele Untersuchungen zum AR-Einsatz in verschiedenen Bereichen wurden in den letzten Jahren durchgeführt. Vor allem im Forschungsverbund ARVIKA wurden Grundlagen zum AR-Einsatz in der Industrie erarbeitet [Fri-04]. Dabei handelte es sich um Aspekte der Hardware wie Datenbrillen [Oeh-04], aber auch um Einsatzfelder vor allem im Bereich der Produktion ([Alt-03], [Wie-04], [Pat-04]). Die Technikzentrierung vieler AR-Anwendungen weicht langsam einer stärkeren Berücksichtigung des Benutzers. Der Mensch ist ein zentrales Element und das AR-System muss ergonomisch optimal an ihn angepasst sein. Neben der einseitigen Fokussierung auf die Technik sind fehlende Untersuchungen zur Prozessintegration von AR ein weiteres Manko. Die Kommissionierung wurde mehrfach als Anwendungsfall für AR erwähnt ([Mue-05], [ScB-07a]), doch fand keine systematische Un-

¹ Die Mensch-Maschine-Schnittstelle umfasst „die zeitvariante Interaktion von Mensch und Technik zur Erzielung möglichst optimaler technisch-ergonomischer Arbeitsergebnisse unter humanen Arbeitsbedingungen. Der Begriff Maschine umschreibt alle technischen Systeme in der Produktion, Logistik und Information“ [Bok-06].

tersuchung hinsichtlich Einsatzfällen oder Anforderungen aus logistischer Sicht statt. Es handelte sich lediglich um Grundlagenuntersuchungen im Labor, aber um kein praxisrelevantes Szenario mit entsprechender Hardware. Bei der ersten Untersuchung zum Einsatz einer Datenbrille in der montagenahen Kommissionierung konnten Einsparungen von ca. 26 % gegenüber dem aktuellen Prozess und von ca. 57 % gegenüber der MTM-Zeit² erreicht werden. Das größte Einsparpotenzial liegt in der Parallelisierung von Informationsaufnahme mit den Nebentätigkeiten sowie in der Reduzierung der Suchzeiten [Alt-03].

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Entwicklung eines mobilen AR-Systems für die Kommissionierung unter Einsatz einer Datenbrille (Pick-by-Vision) im Spannungsfeld zwischen Logistik, Informatik, Ergonomie und Psychologie (siehe Abbildung 1-2). Es soll

- ein lauffähiges AR-System entwickelt,
- konkrete Anwendungsfälle in der Kommissionierung aufgezeigt,
- eine Steigerung der logistischen Kennzahlen erreicht und
- ein aus arbeitsschutzrechtlichen und ergonomischen Gesichtspunkten bestmögliches System unter Aspekten der benutzerzentrierten Gestaltung³ konzipiert werden.

„Die Nutzerakzeptanz ist dabei im Sinne eines K.O.-Kriteriums entscheidend für die Realisierung der Prozessverbesserung“ [Fri-04]. Der Fokus liegt somit auf der Kommissionierung und dem Menschen. Das System ist in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Augmented Reality (FAR)⁴ der TU München entstanden. Daher wird auf

² MTM: Methods-Time Measurement (siehe Kapitel 8.1)

³ „Die benutzerzentrierte Gestaltung ist eine Art der Entwicklung interaktiver Systeme, die sich darauf konzentriert, Systeme gebrauchstauglich zu machen. ... Die Anwendung des Wissens über menschliche Faktoren und Ergonomie bei der Gestaltung interaktiver Systeme erhöht die Effektivität und Effizienz, verbessert die Arbeitsbedingungen des Menschen und wirkt möglichen nachteiligen Auswirkungen beim Gebrauch für die menschliche Gesundheit, Sicherheit und Leistung entgegen.“ [DIN13407]

⁴ <http://campar.in.tum.de/Chair/ResearchAr>

technische Details der Programmierung nur eingegangen, wenn dies unbedingt erforderlich ist.

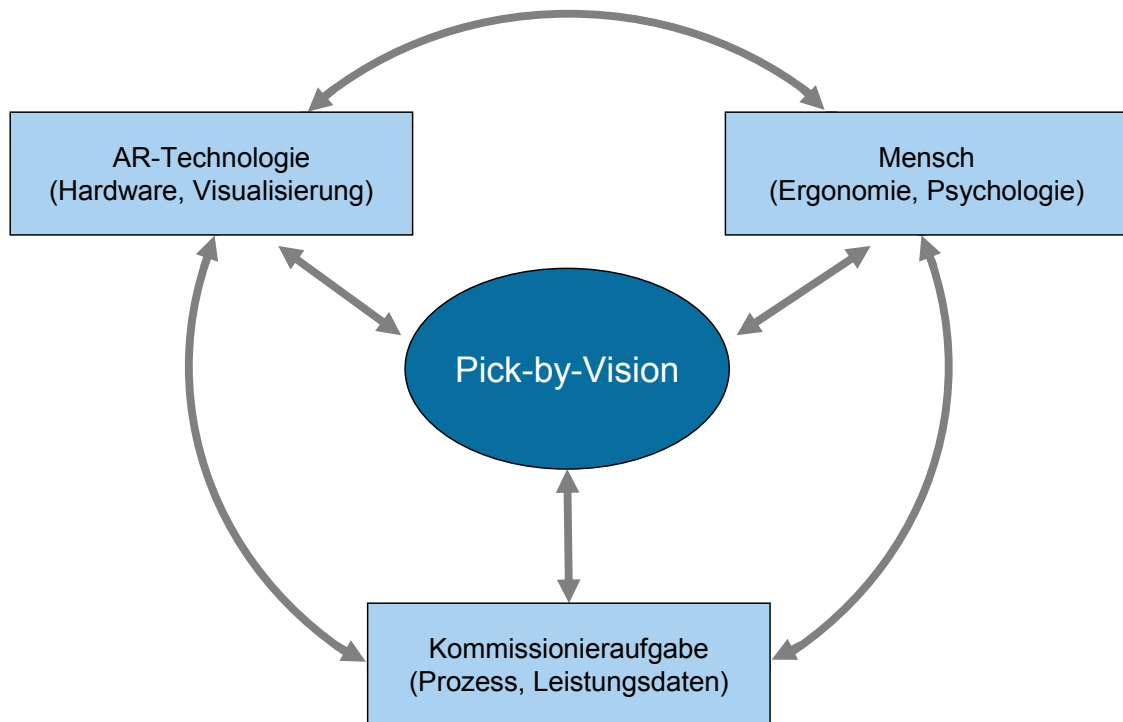


Abbildung 1-2: Pick-by-Vision im Spannungsfeld zwischen der Kommissionieraufgabe, der AR-Technologie und dem Menschen

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 1-3). Nach der Einführung werden die Grundlagen der Kommissionierung erläutert. Es wird auf wichtige Definitionen und in dieser Arbeit benutzte logistische Kenngrößen eingegangen. Da der Mensch ein zentrales Element der Kommissionierung bildet und optimal mit Informationen unterstützt werden muss, widmet sich ein Teilkapitel den Informationsbereitstellungstechniken in der manuellen Kommissionierung.

Im dritten Kapitel werden die Grundlagen der Augmented Reality erläutert. Nach der Definition und der Abgrenzung zur Virtual Reality werden der Systemaufbau und die Einzelkomponenten erklärt. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Datenbrillen, dem Trackingsystem und dem Interaktionsgerät. Abschließend werden verschiedenste industrielle AR-Anwendungen vorgestellt.

Das vierte Kapitel beschäftigt sich zunächst mit den generellen Einsatzmöglichkeiten von AR in industriellen Umgebungen, bevor der Anwendungsfall der Kommissionierung konkretisiert wird. Nach der Erarbeitung, wie AR zur Unterstützung der Kom-

missionieraufgabe eingesetzt werden kann, erfolgt die Ausarbeitung von vier konkreten Einsatzszenarien.

Im fünften Kapitel werden die Anforderungen an das Pick-by-Vision-System aus Sicht der Kommissionierung erarbeitet. Im Fokus stehen die Hardwarekomponenten Datenbrille, Trackingsystem und Interaktionsgerät sowie die Benutzerschnittstelle mit der entsprechenden Visualisierung.

Darauf aufbauend werden im sechsten Kapitel geeignete Hardwarekomponenten ausgewählt und das Konzept für ein Pick-by-Vision-System hinsichtlich der Einsatzszenarien vorgestellt. Die grafische Benutzerschnittstelle wird an den Kommissionierprozess und die ausgewählte Datenbrille angepasst.

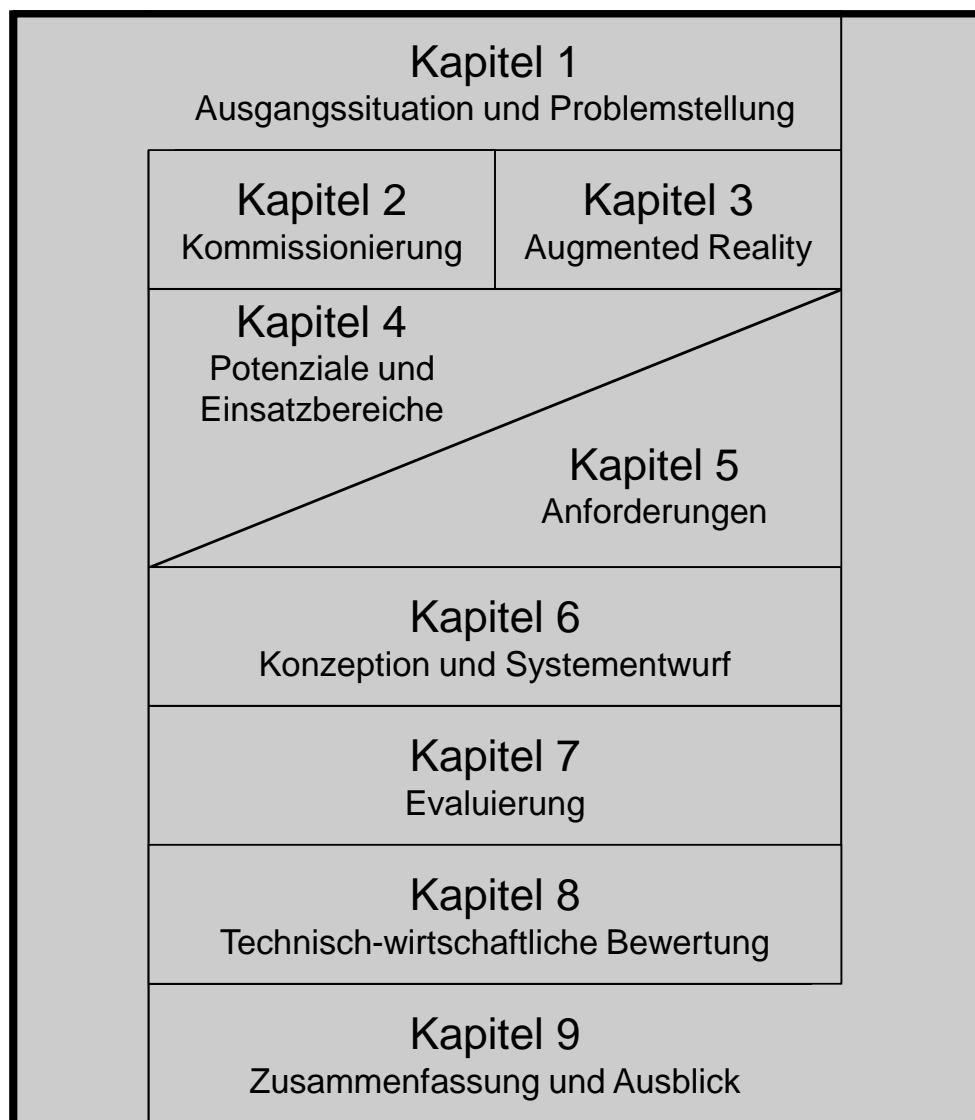


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit und Zusammenhang der neun Kapitel

Im siebten Kapitel wird dieses System anhand eines konkreten Einsatzszenarios mit einer Benutzerstudie evaluiert. Das Ziel der Untersuchung ist neben der Messung von logistischen Kennzahlen die Ermittlung von subjektiven Beanspruchungskriterien. Aus den Ergebnissen lassen sich Optimierungspotenziale ableiten.

Das achte Kapitel dient dazu, aus den Ergebnissen der Evaluierung und mit Hilfe einer MTM-Analyse den technisch-wirtschaftlichen Nutzen eines Pick-by-Vision-Systems aufzuzeigen.

Im neunten Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und reflektiert. Es erfolgt ein Ausblick auf die zukünftige Entwicklung von AR und Pick-by-Vision.

2 Grundlagen der Kommissionierung

Die Kommissionierung ist einer der wichtigsten Prozesse in der logistischen Kette. In diesem Kapitel werden die Begrifflichkeiten, die Einflussfaktoren und der Aufbau von Kommissioniersystemen erläutert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Rolle des Menschen und den Informationsbereitstellungstechnologien.

2.1 Definitionen und Begrifflichkeiten

Das Kommissionieren ist das Zusammenstellen von Teilmengen aufgrund von Anforderungen (Auftrag) aus einer Gesamtmenge (Sortiment) [VDI3590]. Da der Warenfluss vom Hersteller zum Kunden meistens wechselnde Mengen und Zusammensetzung der (Stück-)Güter erfordert, werden Ladeeinheiten aufgelöst, die Einheiten vereinzelt und in einer geänderten, kundenbezogenen Zusammensetzung weiterverpackt, d. h. dass die Güter von einem lagerspezifischen in einen verbrauchsspezifischen Zustand umgewandelt werden [Jün-00]. Die Kommissionierung tritt im Unternehmen an mehreren Stellen auf. Sie dient der Versorgung des Absatzmarktes (Distribution), aber auch der Versorgung von Fertigung und Montage, wodurch interne und externe Kunden-Lieferanten-Beziehungen entstehen [Cro-07]. Die Kommissionierung ist ein entscheidender Maßstab für Qualität und Leistung einer Lieferung [HeV-06] und hat somit direkten Einfluss auf den Servicegrad und den Unternehmenserfolg. Die Kommissionierung ist Schlüsselement der Supply Chain und Kernelement der Intra- sowie Distributionslogistik [Dul-05]. Deswegen wird eine Nullfehlerstrategie, eine hohe Kapazität und Flexibilität bei gleichzeitiger Minimierung der Kosten pro Position gefordert [Han-05]. Beispielsweise können in einem Distributionszentrum des Versandhandels aus einem Sortiment von 35.000 Artikeln von 50 g bis 50 kg und Abmessungen von 50 x 50 x 50 mm bis 5.000 x 100 x 100 mm 80.000 Positionen (Pos) mit 200.000 Entnahmeeinheiten (EE)⁵ pro Tag kommissioniert werden. Die letzte Bestellung kann der Kunde bis 16:30 Uhr (Last-Order-Time) aufgeben und erhält die Lieferung innerhalb Deutschland am nächsten Tag. An diesen Zahlen ist zu erkennen, dass die Kommissionierung die schwierigste und bedeutendste Auf-

⁵ In dieser Arbeit werden die Begriffe Entnahmeeinheit und Pick synonym verwendet.

gabe der innerbetrieblichen Logistik [Lol-03] und somit einer der arbeits-, personal- und kostenintensivsten Bereiche im Lager ist [ten-04]. Der größte Anteil des Material Handling erfolgt in der Kommissionierung, wobei der Anteil der menschlichen Arbeit selbst in Deutschland noch sehr hoch ist [Lün-05]. Es besteht ein großes Rationalisierungspotenzial durch individuelle Anpassung im Hinblick auf Organisation, Informations- und Materialfluss sowie der Integration in die Logistikkette [Han-05].

2.2 Erfolgsfaktoren in der Kommissionierung

Das klassische magische Dreieck der Logistik enthält die drei strategischen Erfolgsfaktoren Qualität, Kosten und Zeit. In den letzten Jahren ist die Flexibilität zu diesen Faktoren aufgestiegen [Voi-07a], so dass sich ein magisches Viereck bilden lässt (siehe Abbildung 2-1), deren Faktoren im Folgenden erläutert werden.

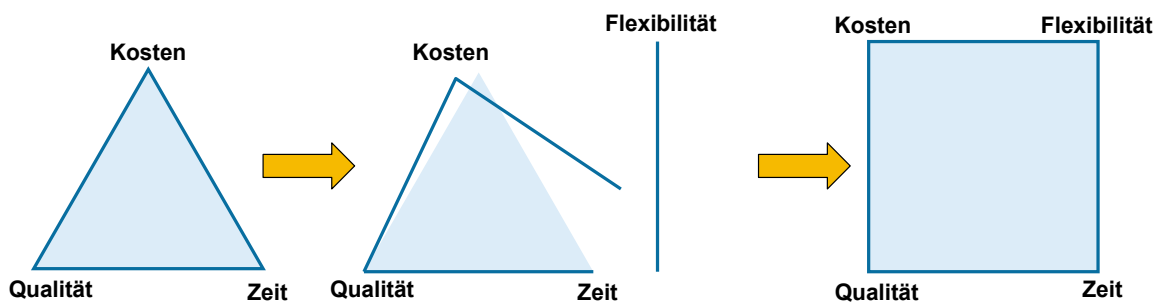


Abbildung 2-1: Aus dem magischen Dreieck wird das magische Viereck der Logistik

2.2.1 Kommissionierkosten

Der Anteil der Logistikkosten ist davon abhängig, welchen Anspruch die Logistik im Unternehmen gerecht werden muss. Beim Handel ist die Logistik Kernkompetenz, wodurch die Lagerung, Kommissionierung und Distribution der Waren meist in eigener Verantwortung stehen. Die Messung der Logistikkosten stellt viele Unternehmen vor große Schwierigkeiten. Der Logistikkostenanteil ist von 1990 bis 2005 von 15 auf ca. 5 bis 8 % der Gesamtkosten gefallen und bleibt bis 2010 konstant [Str-05]. Die Kosten für Distributionszentren machen abhängig von der Branche zwischen 20 und 31 % der Supply Chain Kosten aus. Ein Vergleich ist aufgrund der vielen unterschiedlichen Individuallösungen für diese Aufgabe schwierig [Ali-06]. Im Handel beträgt der Anteil der Lagerung und Kommissionierung 29 % der Logistikkosten [Str-05]. Die Kommissionierung ist die zeitaufwändigste Lagertätigkeit, so dass etwa

65 % der Mitarbeiter im Lager mit der Auftragsbearbeitung und -zusammenstellung beschäftigt sind. Da 60 bis 80 % der Kosten im Lager Personalkosten sind [Hüb-06], entfallen ca. 40 bis 55 % der Lagerkosten auf die Kommissionierung (siehe Abbildung 2-2). Ein weiterer großer Teil der durch die Logistik erzeugten Kosten entsteht durch menschliche Fehler, weil im Lager oft schlecht ausgebildete Mitarbeiter oder Leiharbeiter wertschöpfende Prozesse in Hochlastperioden durchführen [Dan-05]. All dies zeigt, wie groß das Potenzial zur Kosteneinsparung durch eine Reduzierung der Mitarbeiter bzw. das Vermeiden von Kommissionierfehlern ist. Die Betriebskosten eines Kommissioniersystems werden auf die Leistungseinheiten, in denen das Ergebnis des Kommissionierens gemessen wird (v. a. Position, Entnahmeeinheit, Versandeinheit), umgelegt. Die Kommissionierkosten fallen mit zunehmendem Leistungsdurchsatz, weil sich die Fixkosten auf eine ansteigende Anzahl Leistungseinheiten verteilen. Gleiches gilt, wenn die Anzahl der Auftragspositionen steigt, weil die anteiligen Kosten für die Auftragsbearbeitung, die Bereitstellung, die Bildung der Versandeinheiten und – bei statischer Bereitstellung – für die Wege zwischen den Entnahmeplätzen geringer werden [Gud-05].

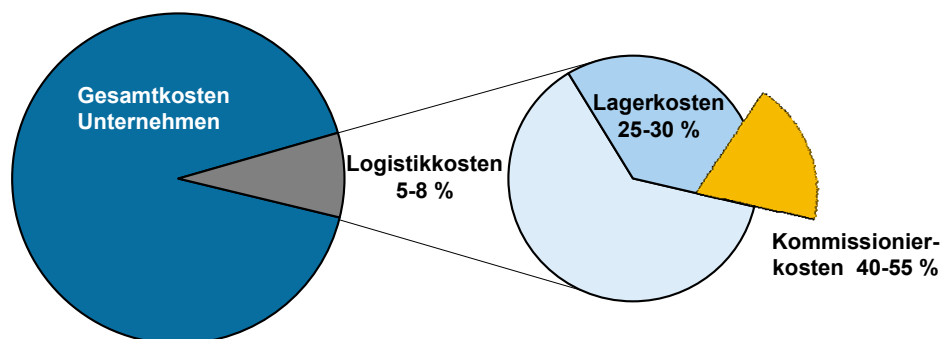


Abbildung 2-2: Anteil der Kommissionierung an den Gesamtkosten

2.2.2 Kommissionierqualität

Eine häufige Ursache für Kosten ist eine mangelnde Kommissionierqualität, die insbesondere durch Kommissionierfehler entsteht. Kommissionierfehler können wegen interner und externer Kunden-Lieferanten-Beziehungen die Produktion und die Kundenzufriedenheit beeinflussen. Fehlerkosten sind schwierig zu kalkulieren, aber schon der Zeitpunkt der Aufdeckung entscheidet über die Höhe der Kosten [Cro-07]. Intern lassen sich durch Nullfehlerprozesse die Kosten zur Lagerabwicklung auf ein

Minimum reduzieren [Her-01]. Fehler, die zum Kunden durchschlagen, führen zu Retouren, Garantiereparaturen und Rückrufaktionen und untergraben das Vertrauen [Fis-94]. Zusätzlich entstehen noch Kosten der Beseitigung, Gewährleistungs- und Kulanzkosten und gar nicht kalkulierbare Kosten wie ein Imageschaden und daraus entgangene Gewinne etc. [Cro-07].

Die Anforderungen an die Qualität in der Kommissionierung ist, das richtige Objekt (Artikel) in der richtigen Menge (Stückzahl) und im richtigen Zustand (Beschaffenheit) zum Kunden zu bringen [DIN 55350]⁶. Kommissionierfehler entstehen durch das Nichteinhalten dieser Qualitätsmerkmale, wobei beim Zustand darauf zu achten ist, ob der Fehler wirklich durch die Kommissionierung entstanden ist. Daraus lassen sich vier Arten von Kommissionierfehlern ableiten (siehe Abbildung 2-3).

- Typfehler: falscher Artikel, zusätzlicher Artikel
- Mengenfehler: zu hohe oder zu geringe Anzahl des richtigen Artikels
- Auslassungsfehler: Auftrag nicht vollständig, z. B. eine Position wurde vergessen
- Zustandsfehler: Beschädigung, falsche Tätigkeit wurde am Artikel verrichtet (z. B. falsche Verpackung, Etikettierung fehlt)

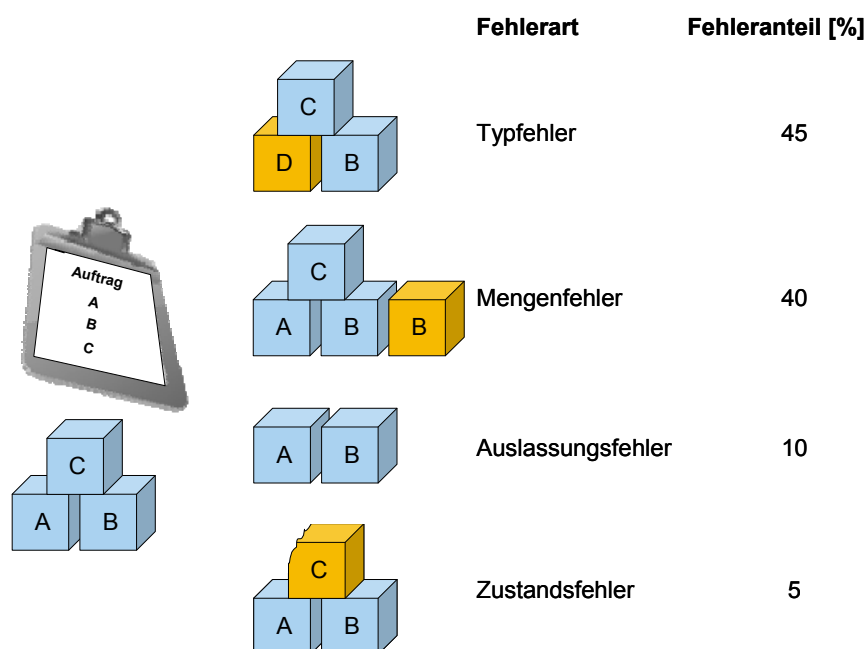


Abbildung 2-3: Arten und Anteil von Kommissionierfehlern (u. a. nach [Men-99])

⁶ Die richtige Zeit (Lieferzeit, Termintreue) wird nur auf der dispositiven Ebene gesteuert, die operative Ebene hat keinen Einfluss [Lol-03].

In der Praxis treten die Fehlerarten unterschiedlich häufig auf. Mengenfehler mit 44 bis 46 % und Typfehler mit 37 bis 42 % sind häufiger wie Auslassungs- (10 %) oder Zustandsfehler (4 bis 7 %) ([Dul-05], [Lol-03]). Diese Fehlerarten können durch verschiedene Fehlhandlungen der Kommissionierer entstehen ([Gud-05], [Vog-97]), z. B.:

- Entnahme aus einer falschen Bereitstellereinheit (Typfehler)
- Verwechslung der Artikel (Typfehler)
- Entnahme der falschen Menge (Mengenfehler)
- Ablage in den falschen Auftragsbehälter (Typfehler)
- falsche Etikettierung (Zustandsfehler)
- Liegenlassen oder Vergessen einzelner Positionen (Auslassungsfehler)
- zu späte Bereitstellung zum Abholen oder Versand (Auslassungsfehler)

Die entsprechende Fehlerquote wird aus der Anzahl fehlerhaft durchgeführter Aufgaben durch die Anzahl aller ausgeführten Aufgaben (Laplace-Wahrscheinlichkeit) berechnet und in der Praxis in Prozent angegeben [Lol-03] (siehe Formel 2-1). Als Bezugseinheit kann z. B. die Anzahl aller kommissionierten Positionen dienen. Eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 0,1 % sagt aus, dass von 1.000 kommissionierten Positionen eine fehlerhaft war.

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

Formel 2-1: Berechnung der Fehlerquote

Die Fehlerhäufigkeit hängt in der manuellen Kommissionierung nicht nur von der Ausfallsicherheit der technischen Komponenten (z. B. Mobiles Datenterminal, MDT), sondern auch von den Eigenschaften und Fähigkeiten sowie der Umsicht der Mitarbeiter ab (technische und menschliche Zuverlässigkeit) [Cro-07]. Die Fehlerwahrscheinlichkeit für technische Hilfsmittel bezogen auf die kommissionierten Positionen liegen in der Größenordnung von 10^{-6} [Bub-01], die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit liegt durchschnittlich in der Größenordnung von 4×10^{-3} [Lol-03]. Beim Pickvorgang bestehend aus Informationsaufnahme und physischer Ausführung ohne den Einsatz von Hilfen zur Fehlervermeidung liegt die Fehlerquote bei 0,3 bis 1,5 % [Fis-

94]. Die Fehlerquote schwankt dabei unabhängig von der Branche und der eingesetzten Kommissioniertechnologie zwischen 0,01 und 3,0 % ([Lol-03], [Mat-04], [Men-99]). Unternehmen, deren Kerngeschäft die Logistik ist (z. B. Handel), weisen eine geringe Fehlerquote auf.

Die Fehlerquote ist auch abhängig von Wartung, Erfahrung, Motivation, Einarbeitungszeit, Ermüdung, Zeitdruck oder Gestaltung der Umgebung [Fis-94]. Die Ursachen menschlicher Fehler sind auf die Aufgabe, die Arbeitsbedingungen (u. a. Mittel zur Informationsbereitstellung) und Leistungsvoraussetzungen zurückzuführen [Cro-07]. Eine Fehlerreduktion lässt sich durch die Gestaltung der Arbeitsablauforganisation, der Arbeitsbedingungen und einer Verbesserung der Qualifikation und der Motivation der Mitarbeiter erreichen [Lol-03]. Da fehlerhafte Kommissioniervorgänge eine kritische Systemgröße darstellen, werden zusätzliche Verfahren zur Kontrolle des Kommissioniervorgangs integriert [ten-04], wobei die Null-Fehler-Kommissionierung aber grundsätzlich nicht erreichbar ist [Gud-05]. Um diesem Ziel möglichst nahe zu kommen, müssen Kommissionierabläufe so gestalten werden, dass Fehler erst gar nicht entstehen, wenn doch, dann sollen sie am besten noch am Entstehungsort entdeckt oder bis Ende dieses Arbeitsgangs korrigiert werden [Fis-04]. Bei den Hilfsmitteln fordert der Kommissionierer Kontrollinformationen an, die er nach dem Pick eingeben, abscannen oder quittieren muss [Gud-05]. Beim Scannen von Barcodes muss sichergestellt werden, dass der Kommissionierer jeden Artikel scannt und nicht einen Artikel gemäß der Entnahmemenge und die anderen ohne Bestätigung entnimmt [ScJ-03]. Mit Kontrollwaagen lässt sich die Fehlerquote ggf. gegen Null senken [Mat-04]. Allerdings können Waagen nicht immer eingesetzt werden. Bei kleinen Gewichtsunterschieden der Artikel kann schon Feuchtigkeit in Kartons oder Paletten das Ergebnis verfälschen.

2.2.3 Kommissionierzeit

Die Kommissionierzeit ist ein Baustein der Lieferzeit. In Zeiten des Internethandels spielt diese eine wesentliche Rolle. Wenn die Lieferung zu lange dauert, schickt der Kunde die Ware zurück [BrL-07]. Die Kommissionierzeit ist ein wichtiger Faktor, damit die richtige Ware noch vor der Cut-off-Zeit auf den LKW verladen wird. Sie setzt sich zusammen aus der Basiszeit, der Summe der Totzeiten, der Greifzeit und der

Wegzeit über alle Positionen [Arn-05] (siehe Formel 2-2). Die Basiszeit fällt nur einmal pro Auftrag an, während die anderen drei Anteile pro Position auftreten.

$$\text{Kommissionierzeit [s]} = \text{Basiszeit} + \sum_{r=1}^n (\text{Wegzeit}_r + \text{Greifzeit}_r + \text{Totzeit}_r)$$

Formel 2-2: Berechnung der Kommissionierzeit für einen Auftrag mit n Positionen

Basiszeit

Die Basiszeit wird auch Auftragszeit [BeT-93] oder Aufrüstzeit [Gud-05] genannt. Sie umfasst die Zeit, die sich der Kommissionierer vor Beginn und nach Abschluss einer Kommissionerrundfahrt an der Basis aufhält. Zur Basiszeit tragen die Annahme und Abgabe von Auftragsbelegen, Ordnen von Kommissionierbelegen nach der Wegstrategie, Übernahme leerer Sammel- oder Versandbehälter, Positionieren für die Übernahme und Abgabe, Abgabe von Ware und Kommissionierbehälter, Zielkodierung und Etikettierung der Behälter bei [Gud-05]. Der Zeitaufwand ist abhängig vom Kommissionierverfahren und der -technik. Beim beleglosen Kommissionieren fallen z. B. Annahme, Ordnen und Abgabe der Pickbelege weg.

Wegzeit

Die Wegzeit umfasst alle Bewegungen zwischen der Annahmestelle, den Entnahmemeorten und der Abgabestelle. Das Gegenteil ist die Verweilzeit, die alle Tätigkeiten und Aufenthalte für einen abgeschlossenen Kommissioniervorgang ohne Fortbewegung (Basis-, Tot-, Greifzeiten) enthält [BeT-93]. Die Wegzeit bestimmt mit 50 bis 70 % am stärksten die Kosten der Kommissionierung [Vog-97] und nimmt bis zu 60 % der Kommissionierzeit ein [Bry-95]. Da sie eine unproduktive Zeit darstellt, gilt es, sie zu reduzieren. Dies kann durch eine optimierte Einlagerungslogistik (Zonenbildung), eine Verkürzung der Kommissionierfront, die Bereitstellung mit Stichgängen, die gleichzeitige Bearbeitung von Aufträgen oder eine Wegoptimierung erfolgen. Ab 20 m Laufweg lohnt sich z. B. auch der Einsatz eines Flurförderzeugs [Vog-97].

Greifzeit

Die Greifzeit umfasst die Entnahme und Ablage der Entnahmemenge und ist somit die eigentliche Leistungszeit [Gud-05]. Durch die Zusammenfassung der Greif- mit der Totzeit erhält man die Zugriffszeit [BeT-93]. Der Zeitblock „Greifen“ beträgt 25 bis 40 % der Gesamtzeit [VDI3657] und dauert zwischen zwei und zehn Sekunden pro

Entnahmeeinheit [Gud-05]. Der Greifvorgang beinhaltet die Teilvorgänge Hinlangen, Aufnehmen, Befördern, Ablegen und Zusatzarbeiten (Ab- oder Zuschneiden, Abwiegen, Vermessen). Die Greifzeit hängt empfindlich von räumlichen Einflussfaktoren des Entnahmeplatzes (maximale und minimale Greifhöhe, Greiftiefe, Ablagewinkel, Ablageentfernung etc.) sowie der Auftragsstruktur (EE/Pos, Volumen pro EE, Gewicht pro EE) ab. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, ob eine Entnahmeeinheit oder mehrere gegriffen werden.

Totzeit

Während Totzeiten wird keine äußerliche Veränderung an den Waren vorgenommen [Alt-03]. Die Totzeit wird auch Rüstzeit genannt, die in der Regel mehr als die in der Regelungstechnik als Totzeit bezeichnete Reaktions- und Informationsverarbeitung beinhaltet. Die Rüstzeit pro Position umfasst die Vor- und Nachbearbeitung des Greifvorgangs am Pickplatz und kann die gleiche Größenordnung haben wie die Greifzeit [Gud-05]. Informationsvorgänge (Lesen, Hören, Suchen und Identifizieren des Entnahmeplatzes, Zählen, Eingeben von Kontrollfunktionen, Belegbearbeitung, Kodieren, Reaktionszeiten) gehören ebenso dazu wie die Positionierung, die den Kommissionierer vor dem Greifen in die richtige Ausgangsposition und danach wieder in Fahrposition bringt (Absteigen und Aufsteigen vom Gerät, Ausrichten des Arbeitsgeräts, Zu- und Abfördern der Bereitstelleinheit, Hin- und Rückbewegung vom Bereitstellplatz). Zusätzlich zum Greifen anfallende Handhabungsvorgänge (Öffnen von Bereitstelleinheiten, Bereitstellen und Verschließen von Verpackungseinheiten, Kodieren und Beschriften, Heraus- und Mitnehmen eines geleerten Ladehilfsmittels (LHM), Vorziehen oder Nachschieben der Zugriffsreserveinheit) und Wartezeiten (auf Nachschubeinheit, auf Information, Blockierzeit durch andere Kommissionierer) sind die weiteren Bestandteile der Rüstzeit. Bei manueller Kommissionierung entstehen Totzeiten durch die Informationsaufnahme- und -verarbeitungsvorgänge der menschlichen Sinnesorgane. Die Totzeit umfasst 20 bis 30 % der Kommissionierzeit [Alt-03]. Auf die Suche nach einem Bauteil entfällt dabei mit 10 % der Kommissionierzeit oft der größte Anteil [VW-03].

Einfluss auf Zeitanteile

Die Kommissionierzeitanteile sind für verschiedene Kommissionierverfahren von sehr unterschiedlicher Größe. Beispielsweise ist die Wegzeit an einem stationären

Kommissionierarbeitsplatz gleich Null. Folgende Parameter haben Einfluss auf die Kommissionierzeit [Arn-05]:

- Größe, Artikelstruktur und räumliche Verteilung des Bestands
- Größe und Artikelstruktur des Kommissionierauftrages
- Konzept des Kommissioniersystems
- technische Einrichtungen des Kommissioniersystems
- Informationsbereitstellung beim Kommissionierer (v. a. Basis- und Totzeit)
- Organisation des Kommissioniervorgangs (v. a. Greif- und Wegzeit)

Den größten Einfluss auf die Kommissionierzeit haben Vorgänge rund um die Entnahme, den zweitgrößten Tätigkeiten, die an jeder Auftragsposition anfallen [Gud-05]. Diese positionsbezogenen Größen haben wesentlichen Einfluss auf die Weg-, Tot- und Greifzeit. Wegen der kleiner werdenden Auftragsgrößen haben sie seit den 1970er Jahren an Bedeutung gegenüber der auftragsbezogener Basiszeit verloren (siehe Abbildung 2-4).

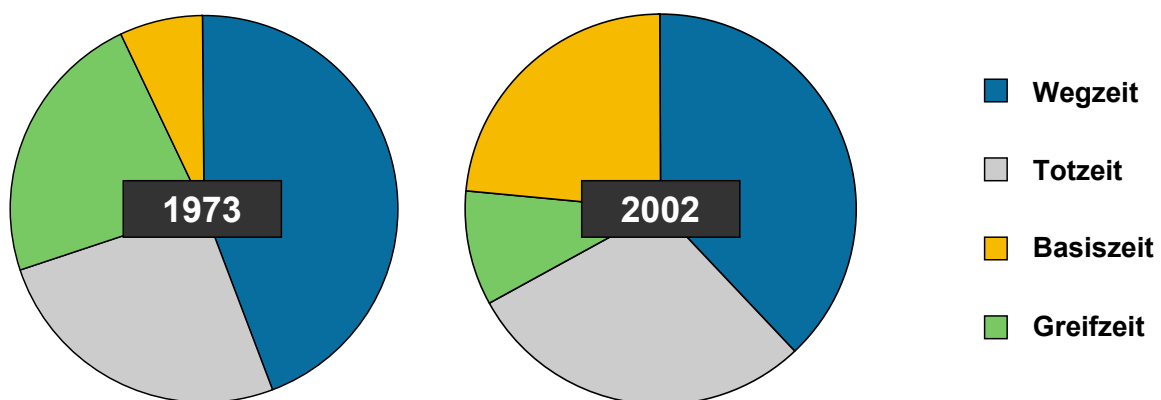


Abbildung 2-4: Veränderung der Kommissionierzeitanteile (nach [Lün-05])

Berechnung der Kommissionierleistung

Die Kommissionierleistung ist eine Produktivitätskennzahl, die allgemein die Ergiebigkeit der Produktionsfaktoren menschliche Arbeit, Betriebsmittel und Material (Output-Input-Verhältnis) beschreibt. Die (mengenbezogene) Produktivität ist der einzige Parameter, der universell für die Wirksamkeitsbeurteilung verwendbar ist [Bok-06]. Die Kommissionierleistung bezieht sich auf die Kommissionierzeit bzw. die Entnahmemenge. Die Leistung in einem Kommissioniersystem lässt sich in Abhängigkeit

verschiedener Bezugsgrößen auf unterschiedliche Weisen berechnen [Gud-05]. Üblicherweise bezieht sich die Kommissionierleistung auf die Anzahl der Positionen unabhängig von der Entnahmemenge pro Position. Die Pickleistung beruht dagegen auf der Anzahl der Picks, also der physischen Greifvorgänge. Problematisch ist, dass der Kommissionierer bei einer Entnahmemenge von zwei Stück beide gleichzeitig oder auch einzeln greifen kann. Die Anzahl an Greifvorgängen lässt sich entsprechend nicht exakt bestimmen. Da die Anzahl der Positionen eindeutig definiert ist und die Anzahl der Picks vom individuellen Greifverhalten der Probanden abhängt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Kommissionierleistung verwendet (siehe Formel 2-3). Die Leistung wird immer auf eine Zeiteinheit, meistens eine Stunde, bezogen. In die Kommissionierleistung gehen dabei alle Zeitanteile ein. Die Leistung kann sich auf ein gesamtes Kommissioniersystem oder auf einen Kommissionierer (Mensch oder Maschine) beziehen.

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

Formel 2-3: Berechnung der Kommissionierleistung

Zusätzlich sind die Auslastbarkeit und Verfügbarkeit des Kommissionierers einzubeziehen [Gud-05]. Ein Kommissionierer ist nicht während der gesamten Anwesenheitszeit für die geforderte Leistung verfügbar. Unproduktive Zeiten sind technische Ausfallzeiten, persönliche Verteilzeiten oder kommissionierfremde Nebentätigkeiten. Unter der Auslastung ist das Verhältnis der Kommissionierzeit zur Summe von stochastisch bedingten mittleren Wartezeit und Kommissionierzeit zu verstehen [Gud-05]. Darunter fallen z. B. Wartezeiten beim Andrang mehrerer Kommissionierer an einer Basis. Bei Leistungsvergleichen ist zu beachten, dass die Kommissionierleistung erheblich von produktspezifischen, mitarbeiterbezogenen und technikorientierten sowie organisationsabhängigen Kenngrößen abhängt [Mat-04]. Dies sind die Artikelstruktur, die Auftragsstruktur, das Layout/Infrastruktur, die Betriebstrategien und die Arbeitsbedingungen [Sad-07]. Die Leistung der untersuchten Systeme schwankt von 5 bis 600 Picks pro Stunde und Mitarbeiter ([Lol-03], [Jün-00], [Mat-04]). Die oft propagierten 1.000 Picks/h sollten nicht das Maß aller Dinge sein, denn es kommt auf den gesamten Prozess an. Es ist nicht zielführend, wenn der Auftrag schnell kommissioniert wird und er dann zwei Stunden in der Verpackung steht [BrL-07].

2.2.4 Flexibilität

90 % der Unternehmen vergeben Leistungen fremd und der Trend zum Outsourcing hält an. Branchenübergreifend sind insbesondere die logistischen Aufgaben Transportieren, Lagern und Umschlagen von der Fremdvergabe betroffen. Über 92 % der Unternehmen vergeben den Transport, 43 % das Lager und 51 % Mehrwertleistungen fremd [Vos-07]. Outsourcing zu LDL wird aus drei Gründen gewählt [Pre-07]:

- Konzentration auf Kernkompetenzen
- Senkung der Logistikkosten
- Steigerung der Flexibilität

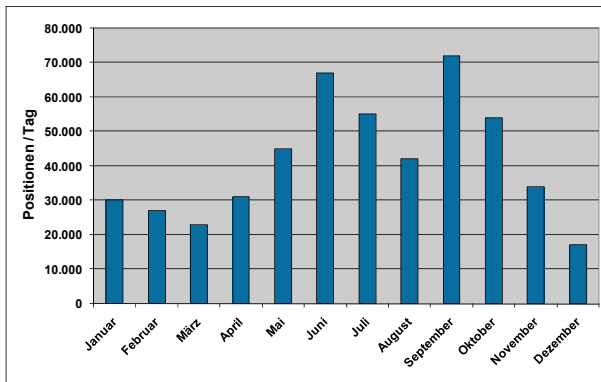


Abbildung 2-5: Saisonale Schwankungen

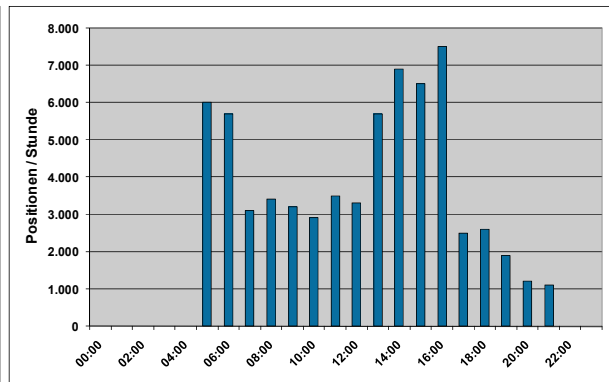


Abbildung 2-6: Tagesschwankungen

Es wird dabei eine Wertschöpfungsstrategie verfolgt, d. h., dass z. B. Arbeitssysteme, in denen keine Kernkompetenzen zum Tragen kommen, möglichst durch Externe betrieben werden sollen [Bok-06]. Durch größere Bedarfsschwankungen und reduzierte Pufferbestände gewinnen Dynamik und Flexibilität an Bedeutung. Die Vertragslaufzeiten mit LDL verkürzen sich immer weiter und somit steigt die Wechselbereitschaft der Industrie [Str-05]. Dadurch benötigen auch die LDL mehr Flexibilität und Reaktionsschnelligkeit. „Flexibilität ist die Fähigkeit eines Systems (Unternehmen oder Netzwerk) selbstständig proaktiv oder reaktiv mit externen oder intern induzierten Veränderungen umzugehen, um die bisherigen Ziele zu erreichen.“ [Voi-07a]. Die Flexibilität ist ein Mittel zum Zweck der Vision der Supra-Adaptivität, um die Geschwindigkeit zu erhöhen, die Anzahl und Spannweite der Handlungsalternativen zu verbessern und die Kosten zu reduzieren. Da sie an Kapazitäten von Ressourcen gebunden ist [Voi-07b], birgt das Personal ein hohes Potenzial zur Steigerung der Flexibilität in der Logistik. Auslastungsschwankungen, wie z. B. in Abbildung 2-5 und

Abbildung 2-6, werden durch interne und externe Instrumente der Personalflexibilisierung begegnet, wobei in Zukunft v. a. die externen steigen [Str-05]. Eine flexible Anpassung der Mitarbeiterkapazitäten bei Bedarf ist dabei wesentlich flexibler als automatisierte Lösungen. Der Personalbedarf schwankt zwischen -20 % und +30 % (v. a. im Handel und LDL) [Str-05]. Für 59 % der LDL stehen die Flexibilität und die Individualisierung der Leistungserstellung im Strategiefokus [Str-05].

2.3 Anforderungen an ein Kommissioniersystem

Aus den vier Erfolgsfaktoren der Kommissionierung lassen sich die Anforderungen an die Kommissionierung ableiten:

- hohe Wirtschaftlichkeit in den Prozessketten (geringere Investitionskosten, minimale Kosten pro Pick)
- hohe, möglichst 100 %ige und konstante Qualität
- hohe Termintreue, Trend zum Same Day Delivery [Lün-05], Eilaufträge
- hohe Kommissionierleistung, kürzere Durchlaufzeiten bei gleichzeitig größerem Durchsatz [Pri-05],
- einschneidende Prozessoptimierung durch Minimierung bzw. Eliminierung ineffektiver Weg- und Leerlaufzeiten [Buc-05]
- hohe Einsatzdauer, Ausfallsicherheit bzw. Notorganisation bei Ausfall des Gesamtsystems, damit die wesentlichen Bereitstellfunktionen sichergestellt sind [Kwi-93]
- schnelle Reaktion auf sich verändernde Artikelstruktur aufgrund Änderungen des Sortiments (Anzahl Güter, Produktvarianten) und dessen Gängigkeit [Lün-05]
- kleiner werdenden Losgrößen (Atomisierung der Aufträge)
- Unabhängigkeit von bzw. Anpassbarkeit an die Belastung (Funktionsfähigkeit unter Spitzenlast ebenso wie unter Normallast)
- Erweiterbarkeit und Integration neuer Komponenten
- Hilfskräfte leichter und schneller einbinden [Lün-02]

Neben den Anforderungen aus den vier Erfolgsfaktoren lassen sich noch weitere wichtige Punkte formulieren:

- Transparenz der Abläufe, aktueller Überblick über den Bearbeitungsstand eines Auftrags [Kwi-93]
- Erbringung von Zusatzleistungen (Etikettieren, Preisauszeichnung etc.) [Kwi-93]
- hohe Anforderungen an ergonomisch gestaltete Arbeitsplätze

2.4 Der Mensch in der Kommissionierung

Die Vernachlässigung des Systemelements Mensch führt zu Fehlentwicklungen, die sich selbst auf sonst optimal strukturierte Kommissioniersysteme auswirken können [Vog-97].

2.4.1 Unersetzlichkeit des Menschen

Die Voraussetzung für eine automatische Kommissionierung ohne Mitwirken des Menschen ist eine hinreichende Gleichartigkeit (Größe, Gewicht) sowie eine regelmäßige Form der Entnahmeeinheiten [Gud-05]. Auch bei Teilen, die sich verhaken können, kann auf die menschlichen Hände und Sinne nicht verzichtet werden. Die Euphorie des Robotereinsatzes ist der Ernüchterung gewichen und beschränkt sich v. a. auf die Zusammenstellung gemischter Paletten oder auf ein gleichartiges Sortiment (z. B. Arzneimittel) [Mat-04]. Für automatisierte Systeme ist zudem eine Leistungskonstanz sowie eine hohe Reproduzierbarkeit der Arbeitsaufgabe gefordert [Bok-06], die in der Kommissionierung aufgrund der starken Schwankungen in der Auftragsleistung sowie der Variantenvielfalt bei den Produkten als auch den Verpackungen oft nicht gegeben sind. Hochautomatisierte Kommissioniersysteme mit einem Fixkostenanteil $< 50\%$ sind nur bei gleichmäßig hoher Auslastung im Mehrschichtbetrieb wirtschaftlich einsetzbar [Gud-05]. Der Mensch besitzt Vorteile in Systemen, wo hohe Flexibilität (flexibel abrufbar und abhängig von Leistungsbedarf einsetzbar), Wahlmöglichkeiten und Optimierungen sowie allgemeine Erfahrungsverwertung gefragt sind [Bok-06]. Im Gegensatz zur Maschine arbeitet der Mensch zielgerichtet, d. h., dass er das vorgegebene Ziel mit verschiedenen Mitteln oder in anderer Aufgabenfolge erreichen kann; außerdem ist er in der Lage, seine fehlerhaften

Handlungsschritte selbst zu überwachen und zu korrigieren, bevor sie sich auswirken [Cro-07]. Neben seinen sensomotorischen Fähigkeiten (äußerst flexible Greiforgane, Sensorik für ungeordnete Bereitstellung sowie hohe Form- und Lageabweichungen, hohe Beschleunigungen, aber geringe mittlere Geschwindigkeit [Jün-00]) wird von den Mitarbeitern Einsatzflexibilität, Reagibilität sowie ein ganzheitliches Prozessverständnis und Erfolgswissen gefordert, um z. B. Prozessstörungen und -veränderungen besser bewältigen zu können. Dazu es ist wichtig, an jedem Arbeitsplatz schnell eingearbeitet zu sein (steile Lernkurve⁷) [WaD-07b]. Der Mensch hat demzufolge eine von keinem technischen System übertroffene Flexibilität und Lernfähigkeit. Dies ist trotz hoher Lohnkosten oft höher zu bewerten, als die Vorteile eines hochtechnisierten, aber unflexiblen Systems [MaH-94], was sich im geringen Automatisierungsgrad in der Kommissionierung von 25 % widerspiegelt [Str-05].

Das angestrebte Ziel muss eine Mensch-Maschine-Funktionsteilung sein, in der Mensch und Maschine die Aufgaben zugewiesen bekommen, für die die jeweiligen Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten optimal sind [Bok-06]. Der Mensch ist ein wesentlicher Bestandteil eines Kommissioniersystems. Seine Fertigkeiten sind in industriellen Umgebungen für die nähere Zukunft nicht zu ersetzen und es wird immer manuell bediente Bereiche besonders in der Kommissionierung geben [BrL-07]. Automatische Systeme müssen ihn dabei unterstützen.

2.4.2 Einflussfaktoren auf den Menschen

Bei der Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen müssen ergonomische Gesichtspunkte (Greifräume, Sehbereiche, Umweltbedingungen, physische Leistungsgrenzen, Kommissionierleistungen) berücksichtigt werden [VDI3657]. Fehleranfälligkeit ist abhängig von Arbeitsorganisation, Prozessgestaltung und Leistungsvoraussetzung des Mitarbeiters. Darunter fällt die Leistungsfähigkeit durch individuelle und situationsabhängige Faktoren und die Leistungsbereitschaft durch physiologische und psychologische Faktoren (z. B. Motivation, Qualifikation, Entgeltsystem) [Cro-07]. Es bedarf qualifizierter und motivierter Mitarbeiter in der Logistik, da diese eine bessere Leistung erbringen, weniger Fehler machen und eine höhere Arbeitsmotiva-

⁷ Mit Hilfe von Lernkurven wird der Erfolgsgrad des Lernens in Abhängigkeit von der Lerndauer abgebildet. Der Lern- und Übungsbegriff werden oft synonym benutzt [Bok-06]

tion haben [Ric-99]. Im Folgenden wird speziell auf psychische Einflussfaktoren eingegangen.

Beanspruchung

DIN ISO 10075 definiert die psychische Belastung als „die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und psychisch auf ihn einwirken“ und die psychische Beanspruchung als „die unmittelbare (nicht die langfristige) Auswirkung der psychischen Belastung im Individuum in Abhängigkeit von seinen jeweiligen überdauernden und augenblicklichen Voraussetzungen“ [DIN10075]. Die Belastung ist ein objektiver, personenunabhängiger Parameter [Bok-06], der alle äußeren Anforderungen einer Arbeit, die sich aus der Art der Arbeitsausführung und der Arbeitsumgebung ergeben, umfasst [Lol-03], während die Beanspruchung die subjektive Belastungswirkung auf den Menschen ist. Die Beanspruchung ist umso höher, je ungünstiger die individuelle Prädisposition ist. Beanspruchungen sind nicht direkt messbar, so dass valide Beanspruchungskenngrößen wie Herzschlagfrequenz oder Herz-Kreislauf-Beanspruchung verwendet werden [Bok-06]. Durch die psychische Beanspruchung wird die Erträglichkeit der Arbeit gemessen.

Die physische Leistungsbereitschaft unterliegt temporären Schwankungen (Tages-, Jahreszeit) und den Umgebungsbedingungen (Wetter, Lärm, Temperatur etc.) [VDI3657]. Die Belastung und die daraus resultierende Ermüdung des Kommissionierers werden in der Verfügbarkeit berücksichtigt, die je nach Arbeitsbedingungen und der Belastung zwischen 80 und 90 % liegt. Die Belastung wird durch organisatorische Maßnahmen (hohe Gleichauslastung der Kommissionierer), gestalterische Maßnahmen (Greif- und Bewegungsräume ergonomisch gestalten, Laufwege verkürzen) oder den Einsatz von Hilfsmitteln (Handhabungsgeräte) versucht zu reduzieren [HeV-06].

Psychische Belastung entsteht durch hohe Konzentration, durch schlechte Informationsbereitstellung, Stress in Arbeitsspitzen oder durch geistige Unterforderung. Kommissionierfehler entstehen auch durch Überforderung des Menschen [Vog-97]. Es passieren zwangsläufig Fehler, weil der Mensch nicht den ganzen Arbeitstag mit der voller Konzentration fehlerfrei arbeiten kann [Fis-94]. Dabei ist der durch Stress entstehende Zeitdruck einer der Haupteinflussfaktoren für die Entstehung von Fehl-

handlungen [Cro-07]. Die psychische Leistungsbereitschaft wird durch ergonomisch gestaltete Arbeitsplätze, das allgemeine Betriebsklima, leistungsgerechte Entlohnung und Motivation durch den Vorgesetzten beeinflusst.

Motivation

Motivierte und aufmerksame Mitarbeiter machen weniger Fehler [Men-99] und das auch in der Kommissionierung, die üblicherweise eine Tätigkeit mit geringen Anforderungen ist [Cro-07]. Die Informationsverarbeitung des Menschen wird durch die Motivation und Aufmerksamkeit beeinflusst [Bub-93]. Wird eine Tätigkeit (Kommissionierung) als motivierend wahrgenommen, sinkt die Fehlerquote, allerdings hat die Kommissionierung ein geringes Motivationspotenzial [Men-99]. Die Motivation ist wichtig für die Leistung eines Kommissioniersystems, die sie bis zu +/- 20 % prägt [Kwi-93]. Sinkt die Motivation, so sinkt auch die Leistung. Die Motivation kann durch intrinsische (Arbeitsorganisation, Entfaltungsmöglichkeiten) und extrinsische Faktoren (Geld, Führung) gesteigert werden [Jün-00].

Erfahrung

Eine häufige Änderung der Prozesse durch Änderungen des Sortiments, Outsourcing etc. führen zu Anlaufphasen. Der operative Mitarbeiter als Kern der logistischen Aktivität ist für einen erfolgreichen Anlauf verantwortlich. Da er auf kurzfristige Änderungen reagieren und improvisieren muss, sind eine gezielte Schulung und Erfahrungswissen wichtig, weil in der Anlaufphase die überwiegende Zahl der Fehler auf mangelhafte Transporteinheiten oder fehlerhafte Bedienung zurückzuführen ist [Lün-02]. Allerdings geben andere Quellen an, dass die Eingangsqualifikation eine geringe Bedeutung auf Fehler hat [Men-99]. Nicht nur die Fehlerzahl, sondern auch die Kommissionierzeit hängt stark von der Erfahrung des Mitarbeiters ab (siehe Beispiel in [Vog-97]). Ziel muss es sein, eine steile Lernkurve zu erreichen. Neben dem Ausgangswissen und den individuellen Fähigkeiten haben die Schwierigkeit des Lernstoffes und die Lernmethode Einfluss auf die Steilheit der Lernkurve. Lernkurveneffekte stellen sich nicht automatisch ein. Sie zeigen Potenziale auf, die man durch gezielte Maßnahmen, wie z. B. die Informationsbereitstellung in der Kommissionierung, realisieren muss. Lerneffekte lassen sich durch quantitative Ergebnisverbesserungen, Fehlleistungsverringerungen und die Abnahme zentralphysiologischer und

peripherphysiologischer Beanspruchungsparameter (z. B. Herzschlagfrequenz) messen [Bok-06].

2.5 Aufbau von Kommissioniersystemen

Der Kommissionierprozess beschreibt wie jeder allgemeine Prozess das zeitliche und räumliche Zusammenwirken der Ressourcen Mensch und Arbeits-/Sachmittel, bei der die Transformation der Eingabe (Input) in die Ausgabe (Output) vollzogen wird [Bok-06]. Deshalb lässt sich ein Kommissioniersystem wie jedes andere Arbeitssystem nach DIN EN ISO 6385 beschreiben [DIN6385]. Mit Systemeingaben wie den Gütern oder der Pickliste wird die Zielvorgabe, d. h. der Kundenauftrag, so bearbeitet, dass die Versandeinheiten das Kommissioniersystem verlassen (siehe Abbildung 2-7). Je nach Detaillierungsgrad kann dabei das gesamte Kommissioniersystem oder nur Teilbereiche als Arbeitssystem betrachtet werden.



Abbildung 2-7: Das Kommissioniersystem als Arbeitssystem (nach [DIN6385])

Anfang der 1970er Jahre begannen die Forschungsarbeiten zur schematischen Darstellung und Klassifizierung der Kommissionierprozesse [Gün-07]. Diese wurden in

der VDI-Richtlinie 3590 zusammengefasst [VDI3590]. Die Richtlinie teilt das Kommissionieren in folgende Grundfunktionen auf:

- Vorgabe der Transportinformation
- Transport der Güter zum Bereitstellort
- Bereitstellung der Güter
- Bewegung des Kommissionierers zum Bereitstellort
- Vorgabe der Entnahmeeinheit
- Entnahme der Entnahmeeinheiten durch den Kommissionierer
- Abgabe der Entnahmeeinheiten
- Quittierung des Entnahmeprozesses
- Transport der Sammeleinheiten zur Abgabe
- Vorgabe der Transportinformation für angebrochene Bereitstellereinheiten
- Transport der angebrochenen Bereitstellereinheit

Des Weiteren teilt die Richtlinie das Kommissioniersystem in ein Organisations-, Materialfluss- und Informationssystem auf, wobei das Organisationssystem die anderen beiden umfasst. Für die Leistungsfähigkeit kommt es nicht nur auf die Einzelsysteme, sondern auf das Zusammenwirken der Komponenten an. Grob gibt es zwei Ausprägungen von Kommissioniersystemen [HeV-06]. Auf der einen Seite stehen die automatisierten Systeme mit dem Ziel eines weitestgehenden Verzichts auf die menschliche Arbeitskraft, die in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet werden, und auf der anderen Seite Mensch-Maschine-Systeme, bei denen die Leistungsfähigkeit des Kommissionierers bewusst technisch-organisatorisch unterstützt bzw. von belastenden Elementen befreit werden soll.

2.5.1 Organisationssystem

Das Organisationssystem übernimmt eine koordinierende Funktion zwischen Material- und Informationsfluss [Lol-03], wobei sich die Organisation und die Technik wechselseitig beeinflussen [VDI3590] und erst eine sinnvolle Verbindung zu einem funkti-

onsfähigen Gesamtsystem führt [Kwi-93]. Das Organisationssystem lässt sich weiter in die Aufbau-, Ablauf-, und Betriebsorganisation unterteilen (siehe Abbildung 2-8).

Organisationssystem					
Teilsystem	Kriterien	Realisierungsmöglichkeiten		Bestimmungsfaktoren	Beispiel
Aufbauorganisation	Zonenaufteilung	einzonig	mehrzonig	Artikelstruktur, bauliche Gegebenheiten	Aufteilung des Kommissioniervorganges in mehrere Zonen (z.B. Zone für Kühlung, Großteile, Langgut)
Ablauforganisation	Sammeln	seriell (nacheinander)	parallel (gleichzeitig)	Auftragsstruktur: Durchlaufzeit Mengendurchsatz	Zerlegung eines Auftrags in mehrere Teilaufträge, die parallel bearbeitet werden Sammeln von Artikeln für mehrere Aufträge in einem Kommissioniergang, danach Zuteilung zu den einzelnen Aufträgen in einem weiteren Schritt
	Entnahme	artikelorientiert (mehrstufig)	auftragsorientiert (einstufig)	Zugriffshäufigkeit	
	Abgabe	artikelorientiert (mehrstufig)	auftragsorientiert (einstufig)	Auftragsgröße Auftragsvolumen	
Betriebsorganisation	Auftragssteuerung	ohne Optimierung	mit Optimierung	Personalbedarf Versandart Systemleistung	Lagerstrategien wie Belegungs- oder Bewegungsstrategie

Abbildung 2-8: Einteilung des Organisationssystems (nach [VDI3590])

Die Aufbauorganisation strukturiert das Kommissioniersystem in funktionale und logistische Bereiche nach bestimmten Artikeleigenschaften (Zugriffshäufigkeit, Handhabbarkeit, Verderblichkeit, Absatzmenge, Wert, Gewicht, Artikelabmessungen, Lagertemperatur, Gefahrgut etc.). Für die Einteilung in Kommissionierzonen wird die Auftragsstruktur nicht berücksichtigt. Ein Lager kann ein- bzw. mehrzonig aufgebaut sein. Beispielsweise lassen sich ein Behälter-, ein Paletten- und ein Sperrgutlager hinsichtlich der Abmaße der Artikel unterscheiden. Eine weitere zu treffende Entscheidung ist die Bereitstellung des Nachschubs. Das Reservelager kann sich innerhalb der Kommissionierzone befinden oder getrennt von dieser angeordnet sein.

Die Ablauforganisation richtet sich nach der Auftragsstruktur und bestimmt den Durchlauf eines Kundenauftrags durch eine oder mehrere Kommissionierzonen und dessen Zusammenstellung (Sammeln und Abgabe). Wird der Kundenauftrag direkt in einen Kommissionierauftrag umgewandelt, erfolgt eine auftragsorientierte bzw. einstufige Bearbeitung mit einer einmaligen Identifizierung und Zuordnung des Artikels zum Auftrag [Jün-00]. Durch Einsatz eines Pick & Pack Konzepts lassen sich Prozessschritte durch die direkte Kommissionierung des Artikels in die Versandeinheit einsparen. Eine Sammlung und gleichzeitige Kommissionierung verschiedener Kundenaufträge wird artikelbezogen bzw. mehrstufig genannt. In der zweiten Stufe werden die Artikel wieder den Kundenaufträgen zugeordnet, wobei oft ein Sorter die Ar-

tikel auf die Endstellen verteilt. Dazu muss der Artikel mehrfach identifiziert werden. Eine mehrstufige Kommissionierung erhöht die Leistung durch Nutzen von Synergieeffekten, z. B. fallen Wege nur einmal an, bedingt aber auch zusätzliche Komplexität [Jün-00]. Des Weiteren können Aufträge das Kommissioniersystem seriell und parallel durchlaufen. Seriell bedeutet, dass ein Kommissionierer jeweils nur eine Sammeleinheit befüllt oder eine Sammeleinheit nacheinander von mehreren Kommissionierern gefüllt wird. Bei paralleler Sammlung werden die Sammeleinheiten auf mehrere Kommissionierer aufgeteilt. Es findet in der Regel nach dem Sammeln eine auftragsorientierte Zusammenführung statt. Gleichzeitiges Sammeln wird meistens eingesetzt, wenn schnelle Durchlaufzeiten erforderlich sind, wenn das Transportvolumen je Kommissionierer zu groß wird oder wenn die Entnahmeeinheiten aus unterschiedlichen Zonen nicht stapelbar sind.

Die Betriebsorganisation mit den Teilaufgaben Auftragsveranlassung, -steuerung und -überwachung hat das Ziel, mehrere Aufträge bedarfsgerecht einzulasten, um eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung, geringen Ressourcenverbrauch, geringe Durchlaufzeiten, hohe Termintreue und ein hohes Qualitätsniveau für das Gesamtsystem zu erreichen [Lol-03]. Sie ist ein dynamisches Mittel, um z. B. auf Bedarfsschwankungen zu reagieren. Dabei gibt es verschiedene Strategien zur Einlastung der Aufträge mit dem Ziel der Optimierung unterschiedlicher Parameter [Jün-00].

2.5.2 Materialflusssystem

Das Materialflusssystem besteht aus Bereitstell-, Transport-, Entnahme-, Abgabe-, Sammel- und Rücktransportsystem [VDI3590] (siehe Abbildung 2-9). Es umfasst die grundlegenden Arbeitsschritte Bereitstellung der Güter, Bewegung des Kommissionierers zum Lagerort, Entnahme der Güter durch den Kommissionierer, Transport der Güter zum Abgabeort und die Abgabe [Lol-03]. Die genaue technische Umsetzung hängt von den Anforderungen des Kunden ab [BrL-07].

Bei der Kommissionierung muss sich entweder der Kommissionierer oder die Bereitstellereinheit bewegen, d. h. es wird die Sammeleinheit oder die Entnahmeeinheit transportiert [ten-04]. Die Güter können statisch bzw. dynamisch bereitgestellt werden. Bei der statischen Bereitstellung bewegt sich der Kommissionierer zur Ware und diese bleibt während des gesamten Entnahmeprozesses in Ruhe (Mann-zur-Ware, MzW). MzW-Systeme enthalten viele nicht wertschöpfende Fahrzeiten, so

dass in den 1970er Jahren in den USA Ware-zum-Mann-Systeme (WzM) entwickelt wurden [Gün-07], die sogenannte dynamische Bereitstellung⁸. Die Aufgabe des Kommissionierers wird auf das Erkennen und Greifen beschränkt, weil die Wegzeiten durch eine Maschine ersetzt werden [Buc-05]. WzM trägt durch die Reduzierung der Wege und das Eliminieren des Tragens der Waren zur Humanisierung der Kommissionierung bei [MaH-94]. Bei einer zentralen Bereitstellung findet die Entnahme an einem räumlich festen Punkt statt, während dies bei einer dezentralen Bereitstellung an verschiedenen Orten erfolgt [ten-07]. Ob die Waren geordnet oder ungeordnet bereitgestellt werden, spielt vor allem für die Automatisierung eine Rolle. Bei der geordneten Bereitstellung sind die Artikel hinsichtlich Position und Orientierung genau definiert bereitgestellt und können leichter automatisiert entnommen werden [Jün-00]. 75 % der Betriebskosten einer Kommissionierung werden bereits mit der Auswahl der Bereitstellung festgelegt [Vog-97].

Die Fortbewegung des Kommissionierers kann dabei auf verschiedenste Weise charakterisiert werden. In dieser Arbeit werden folgende vier räumliche Ausprägungen betrachtet:

- eindimensional ohne Gangwechsel: Bewegung in einem Gang, z. B. entlang einer Regalzeile
- eindimensional mit Gangwechsel: Bewegung in der Ebene, z. B. zu Fuß oder mit einem Hubwagen durch die Regalgassen (keine Hubbewegung)
- zweidimensional ohne Gangwechsel: Bewegung in einer Gasse mit der Möglichkeit der Hubbewegung, z. B. auf RBG oder auf Kommissionierstapler
- zweidimensional mit Gangwechsel: Bewegung durch mehrere Gassen mit der Möglichkeit der Hubbewegung, z. B. (Kommissionier-) Stapler

Die Fortbewegung kann auch hinsichtlich des Automatisierungsgrades in manuell, mechanisch oder automatisch unterteilt werden. Bei WzM müssen auch die Güter auf der Bereitstellereinheit zum Entnahmeort hin- und die angebrochenen LHM wieder zurücktransportiert werden.

⁸ Systeme, wie z. B. das Dynamic Picking System (DPS) der Fa. Witron, kombinieren MzW und WzM. Die statisch in einer Regalzeile bereitgestellten Artikel (MzW) werden von einer dahinterliegenden, mit einem RBG bedienten Regalgasse (WzM) je nach Gängigkeit dynamisch ausgewechselt.

Materialflusssystem						
Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten			Materialflusseinheit	Erläuterung	
Transport der Güter zur Bereitstellung	findet nicht statt	findet statt			Beschickungseinheit	
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional		
		manuell	mechanisch	automatisch		
Bereitstellung	statisch		dynamisch		Bereitstelleinheit	Statisch (Mann-zur-Ware): Kommissionierer (Mensch/Gerät) bewegt sich zur Ware Dynamisch (Ware-zu-Mann): Die Ware bewegt sich zum Kommissionierer
	zentral		dezentral			
	geordnet		ungeordnet			
Fortbewegung des Kommissionierers zur Bereitstellung	findet nicht statt (nulldimensional)	findet statt			Sammeleinheit	Kommissionierer bewegt sich nur auf einer Höhenebene, beispielsweise im Bodenlager. Kommissionierer bewegt sich stufenlos über die gesamte Höhe, beispielsweise in einem Hochregallager.
		eindimensional		zweidimensional		
		mit Gangwechsel		ohne Gangwechsel		
		manuell	mechanisch	automatisch		
Entnahme der Güter durch den Kommissionierer	manuell	mechanisch	automatisch	Entnahmeeinheit	Entnahme entweder von Hand (teilweise unterstützt mit Hilfsmitteln) oder ohne Eingriff des Menschen, beispielsweise durch Robotertechnik.	
	eine Entnahmeeinheit pro Zugriff		mehrerer Entnahmeeinheiten pro Zugriff			
Transport der Güter zum Abgabeort	findet nicht statt	findet statt			Sammeleinheit	
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional		
		manuell	mechanisch	automatisch		
Abgabe des Kommissionierauftrags	statisch		dynamisch		Sammeleinheit & Versandeinheit	Nach Abschluss der Entnahme wird die Ware entweder direkt vom Kommissionierer oder über ein Fördersystem zur einer Sammelstelle gebracht.
	zentral		dezentral			
	geordnet		ungeordnet			
Rücktransport der angebrochenen Ladeeinheiten	findet nicht statt	findet statt			Beschickungseinheit	
		eindimensional	zweidimensional	dreidimensional		
		manuell	mechanisch	automatisch		

Abbildung 2-9: Einteilung des Materialflusssystems (nach [VDI3590])

Der zentrale Prozessschritt der Kommissionierung ist die Entnahme. Eine manuelle Entnahme erfolgt meist bei einem heterogenen Artikelspektrum, einer geringen Leistungsanforderung und wenn Verpackungs- zu Entnahmeeinheiten vereinzelt werden müssen. Sind die Artikel zu schwer oder zu sperrig, wird mechanisiert entnommen, d. h. der Kommissionierer wird von einem Hilfsmittel unterstützt (z. B. Gabelstapler, Kran etc.). Bei einem geeigneten Artikelspektrum kann die Entnahme völlig ohne menschliche Beteiligung automatisch ablaufen (z. B. mit RBG). Aufgrund der Abmessungen und des Gewichts können ein oder mehrere Teile im Zugriff sein [Lol-03]. Die Anzahl an Teilen im Zugriff wirkt sich auf die Leistung aus. Durch Roboter mit Mehrfachgreifern oder Menschen, die mehrere Teile gleichzeitig greifen, lässt sich die Leistung steigern. Die Entnahme der Güter durch den Menschen führt zu hohen Kosten [WeJ-02], wobei er mit seinen sensomotorischen Fähigkeiten bei einem heterogenen Sortiment oft im Vorteil ist. Mit seinen kleinen und quaderförmigen Artikeln ist der Pharmahandel wie so oft ein Trendsetter in der Automatisierung [Gün-07].

Wenn der Kommissionierer und der Abgabeort räumlich getrennt sind, ist ein Transport der Güter nötig, der äquivalent der Bewegung des Kommissionierers zum Lage-

rort definiert ist. Die Abgabe der Güter kann statisch, wenn der Abgabeort zum Zeitpunkt der Abgabe in Ruhe ist, bzw. dynamisch auf ein bewegtes Fördermittel erfolgen. Analog zur Bereitstellung lässt sich die Abgabe in zentral oder dezentral bzw. geordnet oder ungeordnet einteilen. Pick-to-Belt bezeichnet die direkte Ablage der Ware nach der Entnahme auf automatischen Förderanlagen (dynamisch, dezentral), wodurch eine Reduzierung von Wegzeiten erreicht wird [Gün-07].

2.5.3 Informationssystem

Eine fehlerfreie, vollständige, rechtzeitige und bedarfsgerechte Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen ist Voraussetzung für Erbringung der Kommissionierleistung [Jün-00]. Das Ziel der Informationsweitergabe in der Kommissionierung ist nicht die Kontrolle, sondern die Führung des Menschen [ScJ-03]. Die Informationsbereitstellung beeinflusst die Entstehung von Pickfehlern wesentlich [Lol-03] und umfasst 10 bis 20 % der Entnahmezeit bzw. zwei bis vier Sekunden pro Position [Vog-97]. Deshalb bietet die Informationsbereitstellung großes Rationalisierungspotenzial. Das Informationssystem umfasst die vier Schritte Auftragserfassung, -aufbereitung, -weitergabe und Quittierung [VDI3590] (siehe Abbildung 2-10).

Bevor ein Kundenauftrag in die Kommissionierung eingelastet werden kann, erfolgt eine Erfassung und Aufbereitung. Die Aufträge gehen per Post, Telefon, Telefax, Internet oder EDI (Electronic Data Interchange) ein. Die Daten müssen entsprechend aufbereitet und informativ mit den spezifischen Daten für das Kommissioniersystem verknüpft werden, so dass ein Kommissionierauftrag entsteht. Dabei werden auch Aufträge zu Auftragsgruppen (sog. Batches) zusammengefasst.

Bei der Weitergabe des fertigen Kommissionierauftrages an den Kommissionierer ist die Informationsbereitstellung, d. h. die Menge und Struktur der Auftragsinformationen entscheidend. Beispielsweise muss die Lagerortverschlüsselung kurz alphanumerisch, logisch und gleichartig in allen Zonen sein. Mit diesen Informationen muss der Kommissionierer den Bereitstellort und die entsprechende Ware identifizieren und die Menge (in Greifeinheiten) entnehmen, wobei er die Informationen positionsweise aufnimmt [Vog-97]. Die Informationen können in Papierform oder papierlos⁹

⁹ In dieser Arbeit wird papierlos anstatt beleglos verwendet, da sonst das Gefühl entsteht, die Weitergabe erfolgt ohne Kontrollmöglichkeit [Jün-00].

weitergegeben werden. Es gibt aber auch Mischsysteme, z. B. aus MDT und Etiketten, wobei Medienbrüche in der Informationsweitergabe vermieden werden sollten [ScJ-03]. Eine elektronische Weitergabe kann offline oder online erfolgen. Bei einer online Anbindung ist ein Austausch der Daten zwischen WMS und Kommissionierer in Echtzeit möglich und der Fortschritt der Kommissionierung kann jederzeit eingesehen werden. Online ist unerlässlich bei stark schwankendem Auftragsvolumen für die direkte Einsatzsteuerung des Personals [HeV-06]. Bei einem offline-System werden die Auftragsdaten an der Basis auf das entsprechende Gerät geladen und bei der Abgabe die Auftragsbestätigung weitergegeben. Neben der Komplettierung des Auftrags erfolgt auch die Meldung der Nachschubanforderung erst nach Abschluss des Auftrags.

Informationssystem					
Vorgang	Realisierungsmöglichkeiten			Beispiele	
<i>Vorbereitung der Kommissionierung</i>					
Auftragserfassung	1 manuell	2 manuell automatisch	3 automatisch	1 telefonische Auftragsannahme, manueller Übertrag in Auftragsformular 2 Eintippen Auftrags-Daten, automatische Erstellung des Auftragsformulars 3 online-EDV-Verbindung	
	1 Teilauftrag	2 Einzelauftrag	3 Auftragsgruppe		
Auftragsaufbereitung	1 keine	2 manuell	3 manuell/ automatisch	4 automatisch	1 direkte Weitergabe von Auftragserfassung zur Kommissionierung 2 manuelle Belegbearbeitung 3 manuelle Parametereingabe mit anschließender automatischer DV 4 rechnergesteuerte Bearbeitung, z.B. Abhängigkeit von Systemauslastung
	1 online	1 offline	2 papierbehaftet		
Weitergabe	1 Einzelposition		2 mehrere Positionen		1 EDV-Terminal in Kommissionierzone, Pick-by-Voice 2 Kommissionierliste, Lieferschein 1 Abruf durch Kommissionierpersonal 2 Kommissionierliste
	<i>Durchführung der Kommissionierung</i>				
Quittierung	1 je Entnahmeeinheit	2 je Position	3 alle Positionen		1 automatische Quittierung bei Kommissionierroboter 2 positionsweises Abhaken auf Kommissionierliste 3 Endkontrolle; Quittierung Gesamtauftrag 1 Abhaken auf Kommissionierliste 2 Eintippen in BDE-Terminal 3 automatische Artikelidentifikation durch Barcode nach Entnahme
	1 manuell	2 manuell/automatisch	3 automatisch		

Abbildung 2-10: Einteilung des Informationssystems (nach [VDI3590])

Die Entnahme der einzelnen Artikel und die Abgabe des vollständigen Auftrags müssen quittiert und kontrolliert, sowie ggf. aufgetretene Kommissionierfehler gemeldet werden. Die Quittierung erfolgt je Entnahmeeinheit, je Position oder nach allen Positionen und kann manuell, manuell/automatisch oder automatisch erfolgen [VDI3590]. Bei paralleler Kommissionierung mehrere Aufträge ist sicherzustellen, dass der Abgabeort identifiziert wird und die Zuordnung richtig vorgenommen wurde. Bei der

Kontrolle wird auf Identität und Quantität der Positionen geprüft [Lol-03]. Dies kann durch ein einfaches Abhaken auf der Kommissionierliste oder durch den Einsatz von Hilfsmittel wie Barcodescanner, Prüfziffern, RFID¹⁰-Leser oder Waagen erfolgen. Wiegen des gesamten Auftrags ist abhängig von minimalem Gewicht der Artikel und der Auflösung der Waage. Vor allem bei automatischen Systemen werden an den Artikel angebrachte Identifikationsmerkmale wie Barcodes oder RFID-Transponder ausgelesen [Lol-03].

2.6 Informationsbereitstellungstechnologien

Die Kommissioniertätigkeit erfordert das ständige Aufnehmen von Information vom Kommissionierauftrag, im Kommissionierbereich und vom Kommissioniergut [VDI3657]. Informationsbereitstellung dient der Führung des Kommissionierers [ten-07] und hat einen gewichtigen Einfluss auf seine Tätigkeit, denn sie beeinflusst entscheidend die Totzeiten und die Fehlerhäufigkeit durch Aufnahmegeschwindigkeit, Vollständigkeit, Anordnung oder Lesbarkeit [Gud-05]. Die Hauptursache für menschliche Fehler liegt in der Informationsverarbeitung. Fehler werden erst an der Schnittstelle vom Menschen zur Maschine bei der Informationsumsetzung erkannt, sind aber oft schon bei der Informationsaufnahme entstanden. Die Entstehungsbedingungen sind nicht direkt erkennbar, aber die Auswirkungen der Fehler können beobachtet werden [Lol-03].

Informationsbereitstellung		
papiergebunden	papierlos	
	mobil (online oder offline)	stationär (online)
<ul style="list-style-type: none">▪ Pickliste (Kommissionierbeleg)▪ Lieferschein▪ Etikett▪ elektronisches Kommissioniertableau	<ul style="list-style-type: none">▪ MDT (mit und ohne Scanner, Pick-by-Color)▪ Terminal am Fördermittel▪ Pick-by-Voice▪ Pick-by-Vision▪ Put-to-Light	<ul style="list-style-type: none">▪ stationärer Monitor▪ Pick-by-Light▪ Put-to-Light

Abbildung 2-11: Arten der Informationsbereitstellung

Die Länge eines kognitiven Verarbeitungszyklus, d. h. das Erkennen und Verarbeiten der Informationen, dauert ca. 70 ms [Bok-06]. Menschliche Arbeitsfehler sind auf feh-

¹⁰ RFID: Radio Frequency Identification

lende Information bzw. fehlende oder falsche Nutzung objektiv vorhandener Information zurückzuführen [Cro-07]. Deswegen haben technische Hilfsmittel zur Unterstützung der Kommissionierer bei der Zusammenstellung ihrer Aufträge das Ziel der Produktivitätssteigerung und der Fehlerreduzierung [Lol-03]. Diese können in papiergebunden und papierlos sowie in stationär und mobil unterteilt werden (siehe Abbildung 2-11).

2.6.1 Papiergebundene Informationsbereitstellung

Zu den papiergebundenen Systemen zählen die herkömmliche Kommissionierliste, der Lieferschein bzw. Versandpapiere und das Etikett. Die Kommissionierliste kann alle Positionen enthalten, oder der Kommissionierer führt einen Stapel von Belegen mit jeweils nur einer Position mit, den er beispielsweise direkt dem Sammelbehälter zuweist. Dieser Beleg dient dann in der zweiten Kommissionierstufe dazu, die Aufträge wieder zusammenzuführen. Es kann auch direkt der Lieferschein als Kommissionierbeleg eingesetzt werden. Dieser wird oft als Kopie weitergereicht, ist schlecht lesbar oder enthält viele weitere, für die Kommissionierung unnütze Informationen [Jün-00]. Außerdem fehlt eine Zuordnung der Artikel zu den Lagerplätzen, so dass diese der Kommissionierer selbst tätigen muss. Der Kommissionierer kann auch eine Rolle mit Etiketten mit für den Kunden relevanten Daten (z. B. Verkaufspreis) mit sich führen und klebt diese beim Kommissioniervorgang als Quittierung auf die Artikel. Da die Etikettenanzahl vorgegeben ist und je ein Etikett auf einen Artikel geklebt wird, sind Über- und Untermengen (Mengenfehler) kaum mehr möglich.

Dass die Papierliste nicht immer eine schlechte Lösung sein muss, zeigt die Untersuchung von Lolling, bei der in fast 50 % der betrachteten Kommissioniersystemen Papierlisten mit einer Fehlerrate zwischen 0,05 und 1,22 % eingesetzt wurden [Lol-03]. Für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) ist sie häufig die wirtschaftlichste Lösung. Die Strukturierung ist der Haupteinflussfaktor auf die Fehlerquote [Lol-03], so dass die Kommissionierliste übersichtlich gestaltet werden und optische Elemente (z. B. farbliche Hervorhebung) enthalten soll. Die Grenzen sind jedoch erreicht, wenn es um eine zeitgenaue und aktuelle Informationsweitergabe geht [ScJ-03]. Weitere Nachteile sind der hohe Totzeitanteil durch das umständliche Handhaben der Liste, so dass mindestens eine Hand gebraucht wird, die Blickverschiebung sowie die geringe Flexibilität und die fehlende direkte Anbindung an ein WMS. Re-

geln zur Erstellung einer Kommissionierliste finden sich in der Fachliteratur ([Lol-03], [DLA-06], [VDI3657], [Vog-97]).

Eine neue Entwicklung ist das elektronische Kommissioniertableau [DeS-07]. Es verbindet die Einfachheit der klassischen Pickliste mit den Vorteilen der funkgesteuerten Anzeigesysteme. Die Kommissionierliste wird auf das Tableau gelegt und durch die Hintergrundbeleuchtung mit LEDs¹¹ ist die jeweils zu kommissionierende Zeile hervorgehoben. Über Bedienknöpfe am Tableau (Bestätigung, vor und zurück etc.) wird durch die Liste navigiert. Das Tableau ist auf dem Kommissionierwagen montiert, so dass immer beide Hände frei sind. Der Investitionsaufwand für ein papierloses, funkgesteuertes System wird gespart. Es muss nur das Tableau auf die bestehende Pickliste angepasst werden (z. B. Zeilenabstand).

2.6.2 Papierlose Informationsbereitstellung

Bei papierlosen Kommissioniersystemen werden die erforderlichen Entnahmeanweisungen dem Kommissionierer mittels anderer Medien übermittelt [VDI3311]. Die Arbeitsanweisungen können über stationäre oder mobile Geräte erfolgen. Durch eine online-Anbindung entsteht eine dezentrale Struktur, durch eine drahtlose Funk- oder Infrarotverbindungen werden keine Kabel gebraucht und die Interaktion erfolgt in Echtzeit. Ein Qualitätsmerkmal eines Datenkommunikationssystems sind dabei Antwortzeiten < 1 s [Vog-97]. Bei papierlosen Systemen werden Mobile Datenterminals (MDT), Pick-by-Voice (PbV), Pick-by-Light (PbL) bzw. Put-to-Light (optische Fachanzeigen), unterschieden.

2.6.2.1 Mobile Datenterminals

Ein MDT ist ein Gerät zur Erfassung und Speicherung von Daten, ohne dabei an einen PC-Arbeitsplatz gebunden zu sein. Sie sind ein in der Praxis weitverbreitetes und gängiges System (z. B. 25 % der untersuchten Kommissioniersysteme bei Lolling [Lol-03]), das es als online- und offline-Variante gibt. In das MDT kann ein Scanner zum Auslesen von Barcodes oder eine RFID-Lesegerät integriert sein. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass in das MDT ein Scanner integriert ist. Bereits

¹¹ Light Emitting Diode

bei der Abholung des Sammelbehälters kann es nötig sein, diesen zu scannen. Welche Daten und Arbeitshinweise bereitgestellt werden, hängt von arbeits- und branchenspezifische Randbedingungen ab, wobei meistens nur die Anzeige der nächsten Position (Lagerplatz, Artikel, Auftragsnummer) erfolgt. Ist der Kommissionierer am Lagerplatz angekommen, scannt er diesen und bei der Entnahme die Artikelnummer (nur einen Artikel oder jeden einzelnen Artikel). Durch Scannen reduziert sich die Fehlerquote deutlich (Fehlerquote $< 0,40\%$ mit Scanner, $< 0,70\%$ ohne Scanner [Lol-03]). Wird der Artikel bei jeder Handhabung gescannt, sind Fehlerquoten kleiner $0,08\%$ möglich [Erw-02]. Allerdings erhöht sich mit jedem Scanvorgang der Zeitaufwand. Weitere Leistungseinschränkungen werden durch das Halten des Geräts bei der Tastatureingabe und durch das Lesen der Displayanzeige hervorgerufen. Weitere Nachteile sind oft die schwarze Schrift auf grauem Hintergrund und Reflexblendungen, so dass die Informationen schlecht ablesbar sind [Lol-03]. Deswegen geraten MDT bei hoher Dynamik im Pickbereich sehr schnell an ihre Grenzen [Nei-93]. Durch den Einsatz von Ring- oder Fingerscannern wird versucht, den Handlingsaufwand zu reduzieren. Allerdings sind diese Geräte aus Sicht des Arbeitsschutzes als kritisch einzuschätzen, denn sie können sich leicht in der Regalgeometrie verhaken und zu Verletzungen führen [Wöh-02]. Bei Systemen mit Scanner liegen die Fixkosten bei 10.000 bis 20.000 € sowie 5.000 bis 6.000 € pro Benutzer [DLA-06]. Um Fehler ohne den Einsatz eines teuren Scanners zu vermeiden, hat die Fa. Vanderlande Pick-by-Color entwickelt [Mat-04]. An den Regalfächern sind bunte Symbole angebracht. Ist der Kommissionierer am Lagerplatz angekommen, muss er das Symbol auf dem MDT mit dem am Lagerfach vergleichen. Erst nach der Bestätigung durch ein Drücken des Symbols auf dem Touchscreen bekommt er die Entnahmemenge angezeigt.

2.6.2.2 Pick-by-Light

PbL ermöglicht eine papierlose Kommissionierung durch Führung des Kommissionierers über Lämpchen und Displays. Dazu befindet sich an jedem Lagerfach eine Signalleuchte mit einem Ziffern- oder auch alphanumerischen Display, sowie mindestens einer Quittierungstaste und eventuell Eingabe- bzw. Korrekturtasten. Die Lagerfächer sind bei herkömmlichen Anlagen untereinander verkabelt. Bei modernen Systemen kann auch auf die Verkabelung verzichtet werden und die Datenübertragung

erfolgt über Funk oder dünne Metallbänder ([Irr-06], [Muc-05]). Bei der Kommissionierung leuchtet die Signallampe am Lagerfach der aktuellen Position auf und auf dem Display erscheint die zu entnehmende Anzahl. Die Entnahme wird mittels der Quittiertaste bestätigt und die Bestandsänderung in Echtzeit an die Lagerverwaltung zurückgemeldet. Dieser einfache Ablauf ermöglicht kurze Anlernzeiten auch für Bediener mit geringer Ausbildung und Erfahrung. Das System spricht den dominanten optischen Sinn des Menschen an. Allerdings wird auch der optische Suchaufwand erhöht [Föl-05a]. PbL wird vor allem im Schnellläuferbereich in Kombination mit Durchlaufregalen (im Kleinteilebereich), aber auch mit Paletten- und Fachbodenregalen sowie bei DPS eingesetzt. Die freien Hände und die kurzen Wege, sowie der parallele Ablauf von mehreren Tätigkeiten (z. B. Quittierung während des Gehens zum nächsten Fach) ermöglichen eine hohe Kommissionierleistung von 300 bis 600 Positionen pro Stunde und Kommissionierer [Vog-97]. Die Fehlerquote liegt bei ca. 0,4 % und wird durch die vereinfachte Informationsaufnahme und die gezielte Führung des Kommissionierers erreicht [Lol-03]. PbL ist abhängig von funktionierenden Lämpchen, so dass deren Funktionstüchtigkeit unter hohem Aufwand sichergestellt werden muss (Wartungskosten) [Föl-05a]. Die Ausstattung aller Regale mit den Displays führt zu hohen Installationskosten und einer großen Einschränkung der Flexibilität für Umbauten. Die Fixkosten für ein PbL-System betragen 10.000 bis 20.000 € sowie 90 bis 100 € pro Fach ([DLA-06], [Vog-97]). Aufgrund der Investitionskosten pro Lagerplatz eignet sich PbL nur für hohe Umschlagfrequenzen [Buc-05] und ist nicht mehr wirtschaftlich bei weit mehr als 100 Artikeln, deren Bereitstellplätze entlang eines länger als 30 m langen Weges angeordnet sind [Gud-05]. Der Kommissioniervorgang ist auf die Zusammenstellung von Aufträgen beschränkt und sieht keine Identifizierung von einzelnen Waren vor. Dadurch, dass die Quittierungstaste aus Einfachheit oft vor dem Greifen der Artikel gedrückt wird, entstehen Zählfehler [ten-04]. Obwohl das System nicht personengebunden ist, kann pro Regalabschnitt nur ein Kommissionierer arbeiten.

Um die Nachteile des Systems zu beheben, gibt es verschiedene technologische Ansätze. Damit mehrere Kommissionierer in einer Zone arbeiten können, werden die Lagerfächer mit mehreren Lämpchen in verschiedenen Farben ausgestattet. Für jeden Auftrag gilt dann eine Farbe [Muc-05]. Die Kommissionierqualität (Reduzierung der Zählfehler) kann durch die Integration von Lasersensoren in jedes Lagerfach er-

hört werden [New-03]. Diese registrieren automatisch jeden Griff in das Fach. Bei automatischen Quittierungssensoren muss der Bediener seine Hand in einen schalenförmigen Taster legen, um dadurch die Lichtschranke zu unterbrechen [Ban-08]. Dies senkt die Fehleranfälligkeit auf Kosten einer zusätzlichen Bewegung.

2.6.2.3 Put-to-Light

Die Umkehrung des PbL-Prinzips wird in Put-to-Light-Anlagen eingesetzt. Mit Anzeigen an den einzelnen Sammelbehältern wird dem Kommissionierer durch ein Lämpchen am Ablageort gezeigt, für welchen Auftrag der jeweilige Artikel zu kommissionieren ist [Lol-03]. Dies kann an einem stationären Kommissionierarbeitsplatz (WzM) ebenso erfolgen wie auf speziellen Kommissionierwagen (MzW), auf denen bis zu 20 Aufträge parallel bearbeitet werden können [Kra-06]. SSI Schäfer bietet ein System an, bei dem die Entnahmeeinheit in mehrere Fächer für verschiedene Artikel unterteilt sein kann und der jeweilige Teil der Kiste von oben angeleuchtet wird (PbL) [Buc-05]. Die Ablage erfolgt in verschiedene Schächte, die vor dem Kommissionierer nach dem Put-to-Light-Prinzip montiert sind. Über die Schächte gelangen die Artikel zu den Sammelbehältern. So ist eine Kommissionierleistung von 1.000 Entnahmeeinheiten pro Stunde und Mitarbeiter möglich [Ver-06]. Put-to-Light wird oft bei inversen Kommissionieren eingesetzt [ten-07], d. h. der Kommissionierer dreht mit einer artikelreinen Palette eine Runde durch ein „Lager“ von Versandeinheiten und legt die Artikel, wenn sie benötigt werden, in die Versandeinheit [Gud-05].

2.6.2.4 Pick-by-Voice

PbV-Systeme sind in den USA vielfach im Einsatz und finden auch hierzulande (vornehmlich im Handel) wachsende Verbreitung [Log-04] für konventionelles Kommissionieren mit statischer Bereitstellung. Bei PbV erhält der Kommissionierer seine Anweisungen (Lagerplatz, Entnahmemenge etc.) vom WMS über einen Kopfhörer mit Hilfe computergesteuerter Sprachausgabe. Im Gegenzug erfolgt die Bestätigung verbal über ein am Headset befestigtes Mikrofon. Als weitere Systembestandteile sind ein mobiles Sprachterminal mit Tragegurt, entsprechende Software sowie ein Datenfunksystem zu nennen. Keine andere Technologie gewährt zur Zeit unter Einbeziehung ergonomischer Merkmale einen derart hohen informatorischen Unterstützungsgrad. Der Zuwachs an installierten PbV-Systemen ist einerseits auf deren

technische Weiterentwicklung hinsichtlich Sprachausgabe und -erkennung und andererseits darauf zurückzuführen, dass der Kommissionierer beide Hände und Augen frei hat und sich so mit ganzer Aufmerksamkeit und effizient seinen Haupttätigkeiten (Greifen, Verpacken etc.) widmen kann. Dadurch eignet sich PbV auch zur Kommissionierung schwerer oder voluminöser Kolli- und Artikeleinheiten [HeV-06]. Zudem können Bewegungs- und informatorische Abläufe bis zu gewissen Grenzen parallel stattfinden (z. B. Quittieren der Entnahme und Ablegen des Artikels). Die Sprachausgaben und die dazugehörigen Eingaben bedingen eine straffe Prozessführung und kurze Einarbeitungszeiten [Hil-04]. Durch die mehrfache Eingabe von Prüzfziffern (Nummern am Lagerplatz, letzten Ziffern der Artikelnummer etc.) wird sichergestellt, dass wenige Fehler, d. h. Fehlerraten kleiner 0,10 %, auftreten ([Lol-03], [ten-04]).

Es gibt verschiedenste PbV-Systeme [Föl-05b] und Methoden, die Sprachausgabe (Sprachgenerierung) zu gestalten. Bei Record-and-Play spricht ein Sprecher Botschaften vorher auf den Rechner. Diese Ausgabe mit einer natürlichen Stimme ist aber umständlich zu erweitern. Bei der Text-to-Speech-Methode wird die Ausgabe von einer Software aus Textdaten generiert. Außerdem wird bei der Spracherkennung zwischen sprecherabhängigen und -unabhängigen Systemen unterschieden. Bei sprecherabhängigen Systemen ist vorher ein Sprachtraining von 15 bis 30 Minuten notwendig, bei dem sich die Software auf den Benutzer einstimmt. Dabei wird ein individuelles Sprachmuster erstellt. Der Kommissionierer gibt einen persönlichen Code ein und das System versteht ihn unabhängig von seinen Sprachgewohnheiten (Dialekt, besondere Aussprache). Die Trefferquote liegt im Labor bei 99,9 % und im Lager bei 98 % [Ciu-04]. Bei sprecherunabhängigen Systemen kann jeder mit dem System interagieren. Allerdings hängt die Erkennungsquote von Faktoren wie der Stimmlage, der Lautstärke, der Geschwindigkeit etc. ab, wodurch die Trefferquote niedriger ist. Ungeübte Benutzer kommunizieren oft nicht mit ihrer natürlichen Sprache oder schreien ins Mikrofon, womit sprecherunabhängige Systeme ebenfalls Probleme bekommen.

Wenn der Mitarbeiter den ganzen Tag Befehle mit einer monotonen Stimme erhält, kann dies zu einer Abneigung und Demotivation führen. Eine künstliche Stimme steigert diese Empfindung. Das anfängliche Problem der schlechten Spracherkennung in industriellen Umgebungen ist zwar durch verschiedene Technologien (bessere Mikrofone, Rauschunterdrückung, Aufnahme von Umgebungsgeräuschen mit zweitem

Mikrofon, Software, die Störgeräusche herausfiltert etc. [Föl-05b], [Fri-04], [Hil-04], [Pie-08a]) verbessert, aber noch nicht gelöst. Trotz großer Fortschritte werden Spracheingaben des Nutzers immer wieder nicht erkannt und führen in Folge zu zeitraubenden Wiederholungen der Benutzerbefehle. Durch die Sprachausgabe können auch nur kurze Befehle sequenziell ausgegeben werden. Der Mitarbeiter ist mit diesem System abgeschottet, die Kommunikation der Mitarbeiter untereinander kann behindert werden. Dies wird problematisch, wenn bei Arbeitsschritten, z. B. der Kommissionierung großer, sperriger Teile, miteinander kommuniziert werden muss. PbV-Systeme machen auch nicht in jedem Kommissioniersystem Sinn. Bei einem hohen Wegzeitanteil, d. h. das Verhältnis Wegzeit zu Totzeit ist sehr hoch, bringt PbV kaum Vorteile, da das Potenzial zur Reduzierung der Totzeiten nicht greift [Pie-06]. Bei einem zu geringen Wegzeitanteil können Pausen entstehen, wenn die Ansaugen zu lange dauern. Um die Arbeitsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann die Dialogtiefe reduziert werden, d. h. nur noch einzelne Wörter reichen zur Systemeingabe bzw. die Ausgabegeschwindigkeit wird erhöht [Föl-05b]. Da über die Sprachausgabe zu wenige Informationen dargestellt werden, fordern einige Kunden eine Display-Unterstützung [See-05b]. Deshalb gibt es PbV-Systeme, die um einen kleinen monokularen Bildschirm erweitert sind, um die flüchtigen Informationen, wie die Auftragspositionen oder den gültigen Wortschatz, dauerhaft vor den Augen anzuzeigen ([Pro-06], [Per-06]).

Die Installationskosten betragen 10.000 bis 20.000 € sowie 3.500 bis 10.000 € pro Kommissionierer ([DLA-06], [Pie-08b]). PbV-Systeme weisen den besten Kosten-/Nutzen-Faktor auf und sind sehr flexibel bei relativ geringen Anforderungen [See-05a].

2.6.3 Gegenüberstellung der Informationsbereitstellungstechniken

Papierlose Verfahren führen zu einer Leistungssteigerung in der Informationsbereitstellung [Gün-07]. Der Einsatz hängt von vielen Faktoren ab. Wird beispielsweise die Auftragsstruktur betrachtet, sollte ab drei Positionen pro Auftrag papierlose Kommissionierung in Betracht gezogen werden [Vog-97]. Für die Umstellung von papierbehafteten Systemen auf papierlose existiert eine 30 %-Regel, die besagt, dass sich durch papierlose Lagerprozesse die Produktivität bis 30 % erhöhen und die Fehlerrate um 30 % senken lässt [Her-01]. Dies ist lediglich ein vom Anwendungsfall abhän-

giger Richtwert und mit einer Umstellung geht eine Anpassung des gesamten Kommissioniersystems einher. Papierlose Systeme erhöhen die Geschwindigkeit nicht durch schnelleres Picken, sondern durch die Reduzierung unproduktiver Zeitanteile und sorgen für Aktualität der Bestände mit einhergehender Erhöhung des Lagernutzungsgrades ([VDI3311], [Vog-97]). PbL und PbV haben gegenüber der Liste eine erheblich reduzierte Informationsweitergabe, papierlose Techniken erschließen organisatorische Potenziale, die ohne ihren Einsatz nicht genutzt werden können [ScJ-03]. Da die Auftragsgrößen immer kleiner werden, steigt der Basiszeitanteil [Lün-05], was papierlose Systeme wiederum begünstigt.

Informationsbereitstellung		Durchschnittliche Fehlerquote [%]			
		[Lol-03]	[Mat-04]	[ten-04]	
Papier	Papierliste / Beleg	0,35	0,875	0,35	
	Etiketten / Pick-to-Label	0,50	-	0,37	
papierlos	MDT	mit Scanner	-	0,46	
		ohne Scanner			
	MDT + Etiketten		0,94	-	0,94
	Pick-by-Light		0,40	0,179	0,40
	Pick-by-Voice		0,10	0,250	0,08

Tabelle 2-1: Fehlerquoten für verschiedene Informationsbereitstellungstechniken

Der Vorteil der geringeren Fehlerwahrscheinlichkeiten bei papierlosen Systemen wurde durch die Praxisdaten in der Untersuchung von Lolling nicht generell bestätigt [Lol-03]. Das Spektrum der Fehlerwahrscheinlichkeiten liegt generell zwischen 0,01 und 1,3 %, die durchschnittlichen Fehlerwahrscheinlichkeiten liegen bei 0,35 % (Papierliste) und 0,39 % (papierlos) (siehe Tabelle 2-1). Bis auf PbV liegen die Fehlerwahrscheinlichkeiten über der Papierliste. Eine weitere Aussage ist, dass die Fehlerart von der Technik abhängt. So gibt es z. B. bei PbL wegen der klaren Lagerfachmarkierung relativ wenig Typfehler (25 % der Fehler) gegenüber Papierlisten, wo die Information auf dem Papier mit der Lagerfachbeschriftung und der Artikelnummer abgeglichen werden muss (50 % Typfehler).

Es lässt sich sagen, dass trotz unterschiedlicher Kontrollmöglichkeiten eine Ableitung unmittelbarer Zusammenhänge auf die Fehlerresistenz bei unterschiedlichen Bereitstellungstechniken nicht möglich ist [ten-04]. Die Einführung einer neuen Kommissioniertechnik alleine reicht nicht für eine Fehlerreduzierung aus. Es sind weitere Maß-

nahmen notwendig (Anpassung der Arbeitsabläufe, Schulung der Mitarbeiter). Bei den in der Literatur oft genannten Leistungssteigerungen wurden alte, gewachsene Systeme meist umstrukturiert und neu organisiert. In der Verbesserung ist eine neue, meist papierlose Kommissioniertechnik inbegriffen, der die Verbesserung zugeschrieben wird [Jün-00]. Vor allem bei der Einführung von PbV-Systemen können so enorme Leistungssteigerungen propagiert werden. Wird der richtige Einsatzfall nicht gefunden, kann die Leistungserhöhung auch nur 2 % betragen [Muc-04] oder kein nennenswerter Vorteil bei Aufträgen mit wenigen Artikelpositionen oder hoher Entnahmemenge pro Position erreicht werden [Poo-04]. Auch bei der Kommissionierqualität müssen sich die Hoffnungen von PbV nicht immer erfüllen [BrL-07]. Papierlose Systeme schränken auch die organisatorischen Freiheiten ein und die Mitarbeiter müssen intensiver geschult werden, weil die Lern- und Eingewöhnungsphasen länger sind, damit die gesteigerte Komplexität des neuen Systems beherrschbar wird. Die Entlastung des Menschen von eintönigen Aufgaben sowie die Aktualität der Informationen sind die unabdingbare Voraussetzung, bevor über die Führung des Kommissioniersystems mit koordinierender IT-Unterstützung entschieden wird [ScJ-03].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sämtliche Informationsbereitstellungstechnologien in der Kommissionierung trotz der steten Weiterentwicklung nach wie vor Defizite besitzen. Entweder sie sind zu unflexibel, erfordern einen hohen Handhabungsaufwand oder sind arbeitspsychologisch bedenklich, so dass ein Handlungsbedarf besteht, die Systeme an die heutigen Anforderungen und den Menschen anzupassen.

3 Stand der Technik zur Augmented Reality

Augmented Reality wird in diesem Kapitel mit dem Fokus auf industrielle Anwendungen vorgestellt, wobei die Technologie vor allem auf ihre Einsatzpotenziale in der Kommissionierung geprüft werden soll.

3.1 Definition Augmented Reality

Der Begriff Augmented Reality wurde von T. Caudell und D. Mizell 1992 zum ersten Mal erwähnt [Cau-92]. Bekannter ist der Begriff Virtual Reality (VR), aus dem sich die AR ableiten lässt.

3.1.1 Definition zur Virtual Reality

Die VR stellt eine dreidimensionale, rechnergenerierte Umgebung dar, mit der der Anwender in Echtzeit interagieren kann. Sie ist eine 4D-Simulation (Raum und Zeit) der realen Welt [Ong-04] und kann über die drei I's Immersion, Interaction und Imagination definiert werden (nach [Bur-94]):

- Immersion: Eintauchen des Benutzers in die virtuelle Umgebung durch Anpassen der Position und Blickrichtung sowie durch Einbinden in den Handlungsablauf
- Interaction: direkte Interaktion mit dem virtuellen Modell in Echtzeit
- Imagination: Einbindung in die Szenen durch die der Realität nachempfundene dynamische Darstellung

VR beinhaltet Verfahren der interaktiven 3D-Szenendarstellung – von kostengünstigen monitorbasierten Systemen mit herkömmlichen Eingabegeräten bis hin zu mehrseitigen Projektionsaufbauten (z. B. Powerwall) mit Interaktionsgeräten wie Datenhandschuhen mit haptischem Feedback. Die Technologie ist bereits in den digitalen Produktentwicklungsprozess v. a. in der Automobil- sowie der Luft- und Raumfahrtbranche integriert (Konstruktion, Designstudien, Ergonomieuntersuchungen, digitales Abbild zukünftiger Umgebungen). In der Logistik wird sie ansatzweise z. B. zur Kommissioniersystemplanung [Wul-08], zur Mitarbeiterschulung [WaD-07a] oder zur Anwendung fabriklogistischer Methoden in der Forstwirtschaft eingesetzt [Moc-08].

3.1.2 Begriffsdefinition Augmented Reality

Im Gegensatz zur VR bindet AR den Menschen in die reale Umwelt anstatt in eine künstliche Szene ein. Für AR existieren viele Definitionen, die sich hinsichtlich der Anwendung auf technische Systeme mit unterschiedlichem Aufbau bzw. Funktionalitäten unterscheiden. AR ist nicht nur auf den visuellen Sinn beschränkt [Azu-01b], sondern erweitert beliebige menschliche Sinneswahrnehmungen durch rechnergenerierte Zusatzinformationen [Mil-99], die grafischer, aber auch akustischer oder haptischer Art sein können [Wag-05]. Da der Sehsinn die anderen Sinne dominiert und diese bei der Verarbeitung der Reize im menschlichen Gehirn überdeckt [ScL-04], gilt er als wichtigster Sinn auch für den Einsatz von AR.

R. T. Azuma stellte eine Definition von AR auf, die unabhängig von der verwendeten Technologie ist und folgende drei Punkte erfasst [Azu-97]:

- Kombination von realer und virtueller Welt
- 3D-Beziehung zwischen virtuellen und realen Objekten (Registration)
- interaktiv in Echtzeit

Die realen und virtuellen Daten sollen in der gleichen Welt erscheinen, so dass eine geometrische Interaktion und eine zeitliche Synchronisation zwischen virtuellen Objekten und der Realität nötig ist, um die virtuelle 3D-Objekte exakt und perspektivisch korrekt zu positionieren. Aber nicht für alle virtuellen Daten ist eine derartige Zuordnung nötig. Es lassen sich folgende Arten der Informationsbereitstellung unterscheiden:

- kontextunabhängig: Informationen werden nicht im direkten räumlichen und zeitlichen Bezug zur Verfügung gestellt [Pat-04].
- kontextabhängig, situationsgerecht: Die virtuellen Daten können den betrachteten, realen Objekten zugeordnet werden und erscheinen zur richtigen Zeit am richtigen Ort [Fri-04]. Die zeitlichen Vorteile durch die Verringerung der Informationssuchzeit sind mit einem höheren Erstellungsaufwand der Szene verbunden [Pat-04].
- kongruent: Virtuelle Objekte erscheinen exakt an der gleichen Stelle wie dazugehörige reale Objekte. Eine unterscheidungsfreie, fotorealistische Überlagerung in Echtzeit ist derzeit technisch noch nicht möglich (nach [Alt-03]).

Für die Anwendung im industriellen Umfeld zugeschnitten, beschreibt AR die Anreicherung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von zusätzlichen, rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld positionierten tragbaren Geräten bzw. direkt ins Sichtfeld des Betrachters ([Alt-03], [Oeh-04]). Die Aufmerksamkeit des Benutzers bleibt dabei auf der primären Aufgabe in der realen Welt [Rüg-02]. Für industrielle Anwendungen ist eine kontextabhängige Informationsdarstellung wichtig. Dabei müssen die Informationen zur richtigen Zeit, aber nicht unbedingt lagerichtig eingeblendet erscheinen. In Anlehnung an die drei I's der VR wird AR in dieser Arbeit mit den drei I's Interaktion, Integration und Interpretation definiert (siehe Abbildung 3-1):

- **Interaktion in Echtzeit:** Bei Filmen, wo die Kombination von realen und virtuellen Objekten schon seit Jahren erfolgt, wird dies nicht in Echtzeit, sondern über einen längeren Zeitraum im Filmstudio praktiziert [Wag-05].
- **Integration:** Die menschlichen Sinnesorgane sind in ihrer Leistungsfähigkeit beschränkt, so dass diese seit jeher durch „Prothesen“ gesteigert wird (z. B. Mikroskop). Das AR-System ergänzt die Sinne.
- **Interpretation:** Die Wahrnehmung der physischen Umgebung wird durch eine konstruierte Welt ergänzt. Die reale und virtuelle Welt koexistieren und werden vom Benutzer als Einheit interpretiert.

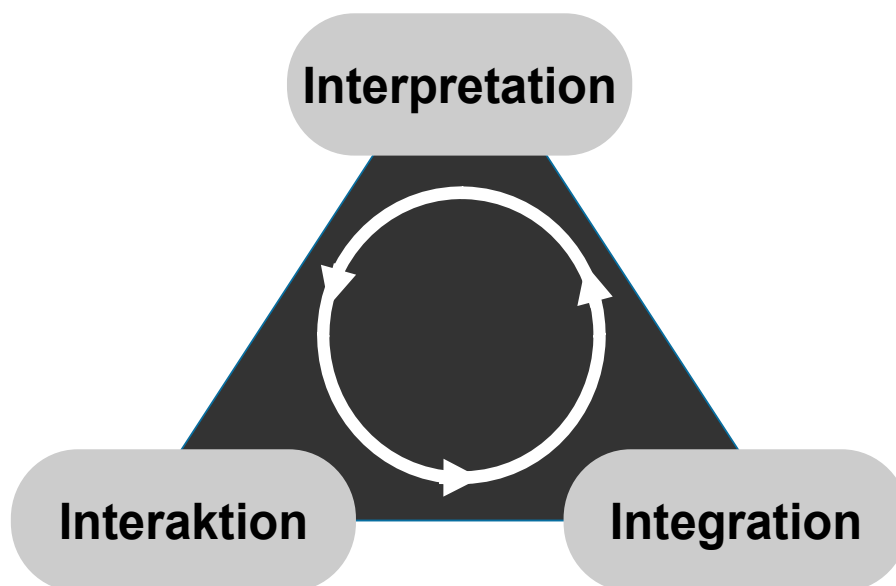


Abbildung 3-1: Die drei I's der Augmented Reality

3.1.3 Gegenüberstellung von Augmented und Virtual Reality

Um den fließenden Übergang von der realen in die virtuelle Welt zu beschreiben, entwickelte Milgram das Reality-Virtuality-Continuum (RV) ([Mil-94], [Mil-99]). Der komplett modellierten, virtuellen Welt steht eine unmodellierte reale Welt gegenüber. Dazwischen befinden sich gemischte Welten aus realen und virtuellen Objekten, die Milgram AR und Augmented Virtuality (AV) nennt (siehe Abbildung 3-2). AR bezeichnet eine um virtuelle Objekte erweiterte reale Szene (z. B. ein Live-Video mit virtuellen Objekten). Bei AV wird eine modellierte Welt um Ausschnitte der realen Welt ergänzt (z. B. virtuelles Objekt mit einem Foto als Textur). Es ist nicht immer sinnvoll, zwischen AR und AV zu unterscheiden, wodurch der Ausdruck Mixed Reality (MR) für den fließenden Übergang eingeführt wurde. MR deckt das gesamte RV-Continuum bis auf deren Endpunkte ab.

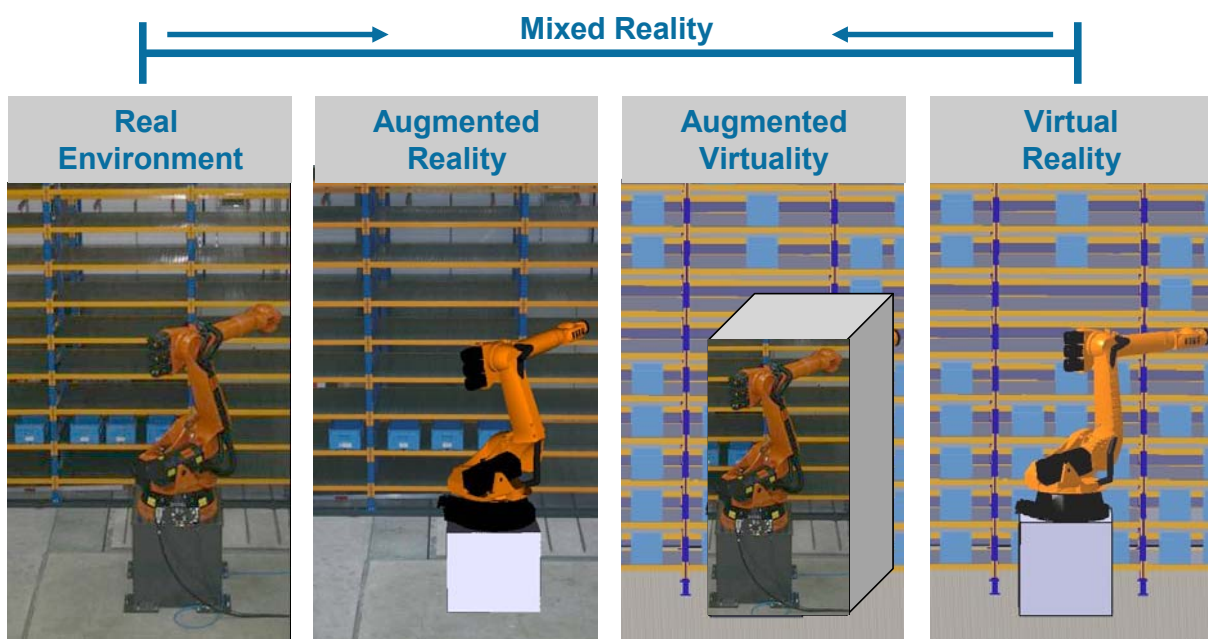


Abbildung 3-2: Reality-Virtuality-Continuum (nach [Mil-94])

AR ist im Reifegrad hinter VR und war ursprünglich als direkter Nachfolger der VR angedacht, als erkennbar wurde, dass die Welt nicht vollständig im Computer abgebildet werden kann [Rüg-02]. Aufgrund der Zielsetzung von VR, ein möglichst detailgetreues Abbild der Realität zu schaffen, stellt sie hohe Anforderungen an die Grafik. In VR muss die ganze Szene berechnet werden, während bei AR der Szenengenerator nur virtuelle Modelle ins Gesamtbild einbettet. Somit sind bei VR auch die Anforderungen an das Display höher. Bei AR ist eine fotorealistische Darstellung nicht un-

bedingt das Ziel. Die Realität muss in AR nicht abgebildet, aber mit den virtuellen Daten verknüpft werden. Daher besteht die höchste Anforderung an AR darin, das Reale und das Virtuelle durch die Erfassung mit Sensoren zusammenzubringen [Kli-01]. AR-Systeme schränken die Mobilität und Portabilität weniger ein. Die Bewegung durch größere, komplett virtuelle Umgebungen ist eine Herausforderung von VR, die beispielsweise durch den Einsatz von 2D-Bewegungsplattformen [STU-08], eindimensionalen Laufbändern [Wul-08] oder durch Fahrsimulatoren [Fas-08] zu lösen versucht wird. Reale Objekte können in VR nur beschränkt miteinbezogen werden, so dass sie sich für Anwendungen mit bereits vorhandenen realen Objekten v. a. in der Produktion und im Service, aber auch in der Produktentwicklung (z .B. Facelifts) weniger eignet. VR wird daher im Produktlebenszyklus vorzugsweise dann eingesetzt, wenn noch keine realen Anlagen oder Produkte vorhanden sind, während für den Einsatz von AR bereits reale Referenzobjekte existieren müssen [Pat-04].

Verfahren Kriterium	VR	AR
Grafik	-- hohe Anforderung → Erstellung der gesamten Umgebung	+ geringe Anforderungen → Erstellung einiger virtueller Objekte
Tracking	o Erfassung des Menschen, innerhalb der virtuellen Umgebung	-- hohe Anforderungen an die Kalibrierung
Mobilität	-- nicht vorhanden (nur mit technischen Hilfsmitteln)	o mobile Systeme möglich, Einschränkungen hinsichtlich Tragekomfort
Einbindung realer Objekte	-- kaum Einbindung realer Objekte möglich	++ Realität als fester Bestandteil (ggf. Tracking nötig)
Einbindung des Menschen	- Mensch ist ohne Hilfsmittel nicht abbildbar (Motion Capturing), höhere Gefahr von Cyber Sickness	+ Mensch im Mittelpunkt

Tabelle 3-1: Vergleich von VR und AR

Eine komplett virtuelle Abbildung von Menschen ist nicht möglich¹², so dass der Benutzer im Zuge der menshintegrierten Simulation direkt in die VR-Umgebung eingefügt wird [Wul-08]. AR hat einen starken Personenbezug und stellt den Menschen stets in den Mittelpunkt. Im Gegensatz zu VR kann AR „nebenbei“ erfolgen und erfordert nicht die gesamte Aufmerksamkeit des Benutzers [Rüg-02]. Wenn die reale Information nicht zur virtuellen passt, kann Cyber Sickness (Übelkeit, Schwindelge-

¹² Das Messen von Bewegungen über Motion Capturing und die Übertragung auf ein virtuelles Menschmodell ist mit dem aufwendigen Anlegen von Sensoren am Menschen verbunden.

fühle, Kopfschmerzen) hervorgerufen werden [Azu-01a]. Diese tritt eher bei vollständiger Immersion, also bei VR auf, weil das Auge andere Eindrücke aufnimmt als die anderen Sinne. Beispielsweise wird dem Auge virtuell eine Bewegung suggeriert, die aber der Gleichgewichtssinn nicht wahrnimmt, weil sich der Mensch nicht bewegt (sog. Vestibular-Okular-Konflikt). Da der Mensch bei AR seine reale Umgebung wahrnimmt, tritt die Differenz der Wahrnehmung verschiedener Sinnesorgane nicht auf. Tabelle 3-1 fasst die Unterschiede zusammen.

3.1.4 Potenziale von Augmented Reality

AR ist eine Intelligence Amplification [Bro-96], d. h., dass ein Computer als Werkzeug benutzt wird, damit für den Menschen eine Aufgabe leichter auszuführen ist [Azu-97]. Der Fokus liegt auf der realen Anwendung, wobei das Potenzial von AR ist, deren Produktivität zu steigern.

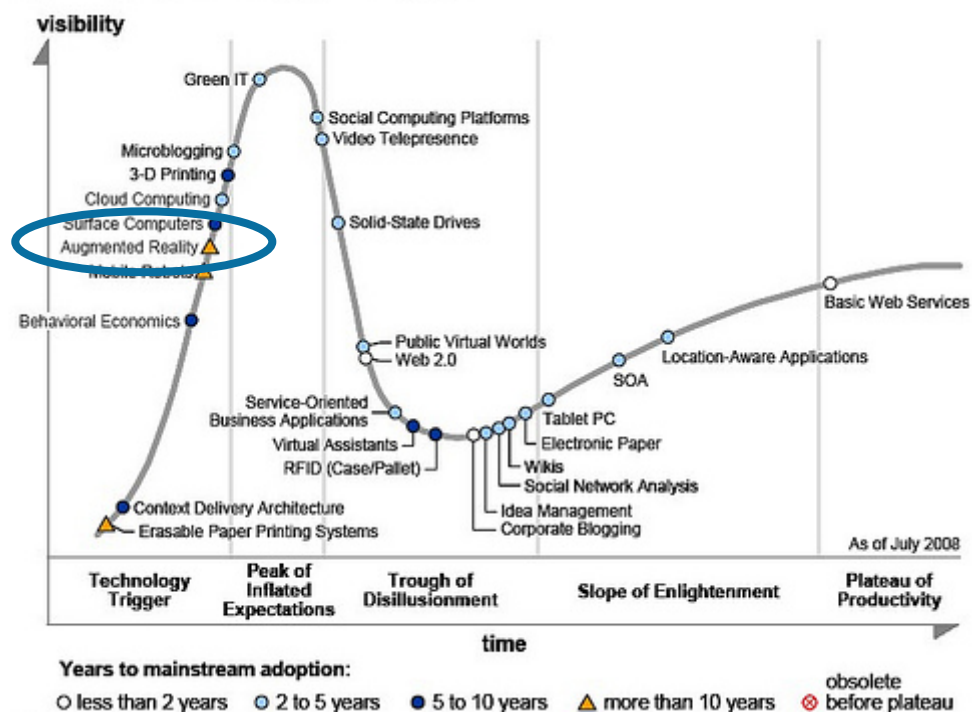


Abbildung 3-3: Gartner Hype Cycle für kommende Technologien [Gar-08]

Die Fa. Gartner führt regelmäßig ein Industriegütermarketing durch und veröffentlicht den Hype Cycle zu verschiedenen Technologiefeldern. Diese grafische Darstellung zeigt den Reifegrad kommerzieller Anwendungen und veranschaulicht den Hype, ggf. die Akzeptanz und die Enttäuschungen bei der Einführung neuer Technologien (siehe Abbildung 3-3). AR wird als kommende Technologie (emerging technologies)

geführt und befand sich 2008 in der ersten Phase (Technology Trigger), in der Technologien gepusht werden (Messen, Kongresse, Veröffentlichungen), aber noch kein Geschäftsmodell vorhanden und die Technologie noch nicht ausgereift ist. Bis zum ersten Gipfel (Peak of Inflated Expectations) erfolgt weder eine kommerzielle Implementierung noch werden Gewinne gemacht. Wenige Unternehmen beschäftigen sich mit der Technologie. Der Fall (Trough of Disillusionment), dass die Technologie an seinen überhöhten Erwartungen und Versprechen scheitern kann, steht noch bevor. Kann dies mit praxisrelevanten Anwendungen überwunden werden, steigt die Kurve das zweite Mal an (Slope of Enlightenment) und führt zum kommerziellen Erfolg (Plateau of Productivity). AR wird von Gartner als eine der Top Ten Technologien für 2008 bis 2012 eingeschätzt [Gar-08].

3.2 Funktionsprinzip und Aufbau eines AR-Systems

Ein AR-System besteht aus den fünf Hauptkomponenten Visualisierungsmedium, Trackingsystem, Datenhaltungssystem, Szenengenerator und Interaktionsgerät (siehe Abbildung 3-4).

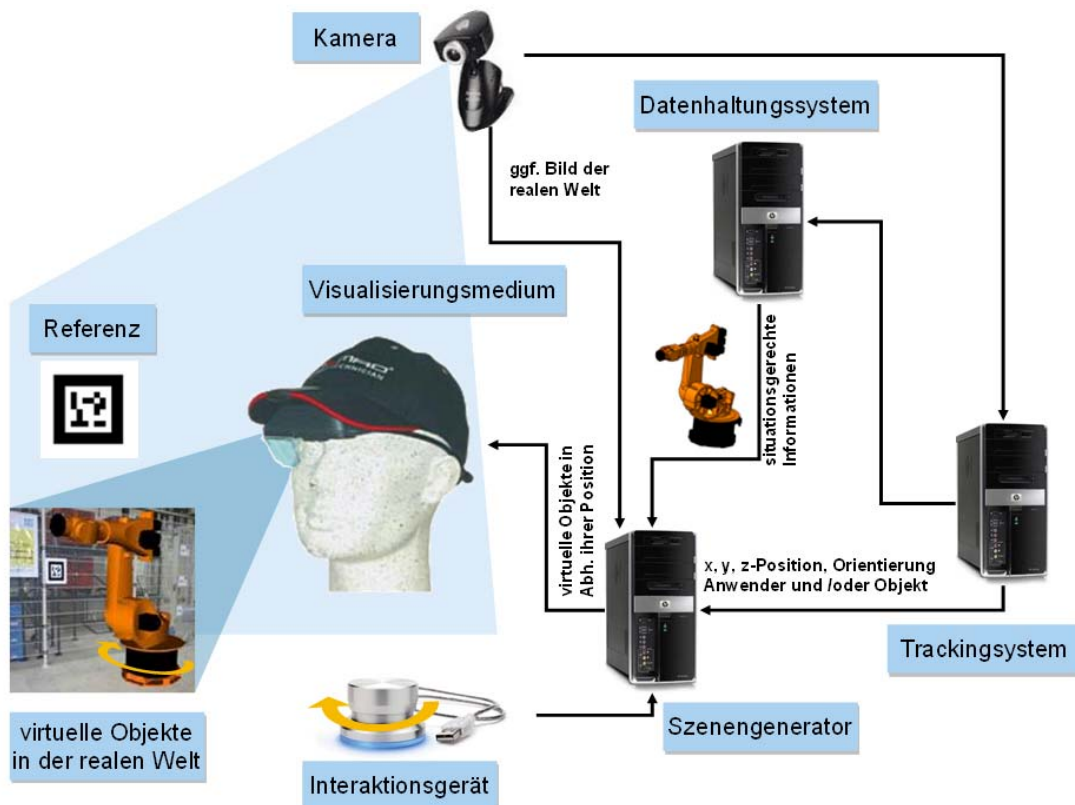


Abbildung 3-4: Aufbau eines AR-Systems

Das Visualisierungsmedium gibt die Szene aus Realität und lagerichtig eingebetteten Informationen aus und ist eine direkte Schnittstelle zum Benutzer. Eine Kamera kann zur Aufnahme der realen Welt und zum Tracking benutzt werden, ist aber nicht zwingend erforderlich. Das Trackingsystem ist notwendig, um die virtuellen Daten mit realen Objekten oder Orten zusammenzubringen [Bow-05]. Im Datenhaltungssystem sind die virtuellen Informationen hinterlegt. Es können alle bekannten computergenerierten Informationen visualisiert werden, angefangen bei Textdokumenten bis hin zu perspektivisch richtig dargestellten 3D-Grafiken. Im Szenengenerator (auch Combiner oder Mischer genannt) erfolgt die Überlagerung der virtuellen Daten mit Seheindrücken der realen Umgebung. Da die realen und virtuellen Objekte gleichzeitig wahrgenommen werden, wird von einer Überlagerung¹³ gesprochen. Um aktiv und in Echtzeit in die Szene eingreifen zu können, benötigt der Benutzer ein Interaktionsgerät – die zweite wichtige Mensch-Maschine-Schnittstelle. Je nach Anforderungen und Anwendungen können die Komponenten eines AR-Systems beliebig zusammengestellt werden ([Alt-03], [Pat-04]). Dabei lassen sich lokale und verteilte Systemkonfigurationen einsetzen [Eve-01]. Ein Vorteil verteilter Systeme ist, dass bei mobilen Systemen nur ein Teil der Rechenleistung am Anwender nötig ist und somit dieser weniger Hardware tragen muss. Da AR als Teil des Wearable Computing¹⁴ gesehen wird, ist es in diesem Fall erforderlich, dass das System in der Bewegung möglichst ohne Einsatz der Hände benutzt werden kann [Rüg-02].

Eine wichtige Anforderung an das AR-System ist, dass die Erfassung der Umgebung über die Informationsverarbeitung und -aufbereitung bis hin zur Ausgabe der Daten in Echtzeit erfolgen muss, d. h. dass es auf Änderung der Eingangsinformationen in einer definierten und möglichst kurzen Zeit reagiert ([Oeh-04], [Pat-04]). Diese Latenzzeit sollte nicht größer als 70 ms (menschlicher kognitiver Verarbeitungszyklus [Bok-06]) sein, wobei sie bei typischen Systemen zwischen 60 und 180 ms beträgt [Rol-01b]. In dieser Zeit kann sich der menschliche Kopf bewegen, und es kann eine Diskrepanz zwischen realer und virtueller Szene auftreten, d. h. die virtuellen Daten sind nicht mehr fix an ein Objekt gebunden, sondern schwimmen hinterher. Dies

¹³ Die Überlagerung kann auch als Overlay bezeichnet werden.

¹⁴ Wearable Computing ist durch leistungsfähige Endgeräte (Rechner, Ein- und Ausgabegeräte, Sensoren), die am Körper des Benutzers getragen werden und bei der Ausführung der primären Tätigkeit größtmögliche Bewegung zusichern, gekennzeichnet [Rüg-02].

kann Cyber Sickness bei AR verursachen, der Mensch kann sich aber auch daran gewöhnen [Oeh-04]. Die Latenzzeit wird v. a. durch das Trackingsystem, die Komplexität der Bilderstellung und die Wiedergabe der Bilder beeinflusst.

3.2.1 Visualisierungsmedien

Das Visualisierungsmedium ist als direkte Schnittstelle zum Menschen ein entscheidender Faktor für die Benutzerakzeptanz und somit auch für den Erfolg eines (industriellen) AR-Systems.

3.2.1.1 Einteilung

Visualisierungsmedien für AR lassen sich durch verschiedene Kriterien untergliedern (siehe Abbildung 3-5). Beim Einsatzort wird zwischen stationären und mobilen Systemen unterschieden. Zu den mobilen Displays sind alle zu zählen, die während des Einsatzes mit dem Nutzer ihren Standort verändern [Sas-08], d. h. der Nutzer führt sie direkt bei sich. AR kann auch an stationären, nicht am Körper tragbaren Monitoren angezeigt werden, worunter auch auf Fahrzeugen montierte Displays fallen. Autostereoskopische Monitore bieten sogar eine Tiefenwahrnehmung [Sut-06]. Mobile Displays können in kopfbasiert und nicht-kopfbasiert (meist handbasiert) eingeteilt werden. Kopfbasierte Visualisierungsmedien werden Head-mounted Displays (HMD)¹⁵ genannt. Oft hängt die Sicht der Szene auch davon ab, ob sie von einem egozentrischen (inside-out) oder einem exozentrischen (outside-in) Blickwinkel betrachtet wird [Mil-99]. Bei AR wird eine egozentrische Sicht mit kopfbasierenden Geräten ebenso wie mit Handhelds umgesetzt.

Die Endgeräte lassen sich in Video-See-Through (VST), Optical-See-Through (OST)¹⁶ und Projektion einteilen. Bei VST-Systemen wird die Umwelt über eine Kamera aufgenommen, im Szenengenerator mit den virtuellen Daten angereichert und über Monitore dargestellt, d. h. der Benutzer sieht ein um die virtuellen Objekte angereichertes Video seiner Umwelt [Alt-03]. Die Monitore können an einem festen Platz stehen, auf einem Wagen montiert sein oder der Benutzer trägt sie bei sich (z. B.

¹⁵ In dieser Arbeit werden die Begriffe Datenbrille und HMD synonym verwendet.

¹⁶ OST wird oft auch nur als ST = See-Through bezeichnet.

UMPC¹⁷). Bei OST ist das Display halbtransparent, und die virtuellen Objekte werden über einen Bildteiler, der in der Sehachse des Anwenders liegt, angezeigt [Fei-02]. Der Benutzer kann auch durch das Display sehen und seine Umwelt wahrnehmen. Bei OST erfolgt die Überlagerung optisch, d. h. erst im Auge, während bei VST die virtuellen Informationen in das Videobild direkt integriert werden. OST wird in HMDs, aber auch als Head-Up-Display (HUD) in Fahrzeugen verwendet. Eine weitere Art der Visualisierungstechnik stellen Projektionen dar, die auch als Everywhere Displays bezeichnet werden [IBM-03]. Ein Projektor projiziert mit einem drehbaren Spiegel ein Bild an eine beliebige Stelle im Raum bzw. auf spezielle Projektionsflächen mit retro-reflektivem Material. Im Gegensatz zu einem HMD können mehrere Beobachter die Szene gleichzeitig und ohne perspektivische Verzerrung betrachten [Sut-06].

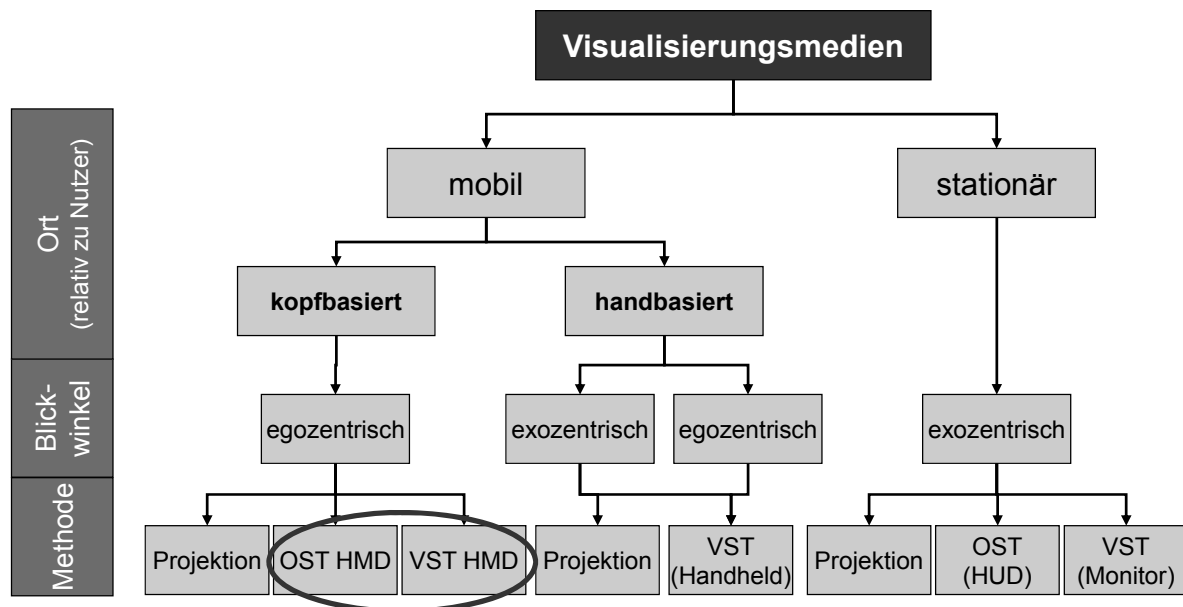


Abbildung 3-5: Einteilung von Visualisierungsmedien für AR mit der Hervorhebung der für diese Arbeit betrachteten Datenbrillen

Die Kommissionierung ist eine mobile Tätigkeit. Damit ist der Einsatz von mobilen Monitoren und Projektoren ebenso möglich wie der von Datenbrillen. In dieser Arbeit wird nur die Datenbrille (OST als auch VST) als Visualisierungsmedium weiterverfolgt.

¹⁷ UMPC: Ultra Mobile PC

3.2.1.2 Datenbrillen

Das Arbeitsmittel Datenbrille hat ganz andere Eigenschaften als herkömmliche Computerdisplays. Deshalb ist eine unabhängige Betrachtung notwendig [Oeh-04]. HMD unterscheiden sich drastisch in ihrem Aufbau (Bildquelle, optische Kriterien), so dass nicht von dem HMD gesprochen werden kann. Heute werden allgemeine Ausgabe-geräte mit einem oder zwei über eine Halterung am Kopf befestigte Mikrodisplays als HMD bezeichnet [Rüg-02].

Sutherland entwickelte die erste Datenbrille mit einem stereoskopischen OST-Display aus zwei Kathodenstrahlröhren¹⁸ bereits in den 1960er Jahren [Sul-68]. Es ist nur eine geringe Auswahl an HMDs mit geringer Benutzerakzeptanz am Markt verfügbar. Obwohl Experten seit Jahrzehnten annehmen, dass ein Boom um HMDs einsetzen wird, ist dieser – bis auf eine Phase in den 1990er Jahren [Wie-04] – noch ausgeblieben. Gründe dafür sind die unterschätzte Komplexität und die benötigte Zusammenarbeit vieler Disziplinen (Elektrotechnik, Optik, Medizin, Sozialwissenschaften, Psychologie) [Ede-05].

Optische Grundlagen

Im Folgenden werden für diese Arbeit die Begriffe Adaption, (Kon-)Vergenz, Akkommodation und Okularität erläutert.

Die Adaption ist die Anpassung der Empfindlichkeit des Auges an die jeweils herrschende Beleuchtung. Beim Sehen ist das Ziel, die relative Unterschiedsempfindlichkeit unabhängig von der mittleren Leuchtdichte einzustellen ([Bok-06], [Hau-94]).

Die Vergenz umfasst die Steuerung gegensinniger Augenbewegungen, um die Sehachsen¹⁹ auf einen Gegenstand auszurichten, so dass ein in Fixationsentfernung betrachteten Punkt im Raum auf korrespondierenden Netzhautstellen in der Fovea²⁰, der Retina²¹ abgebildet wird. Als Konvergenz wird eine Augenbewegung bezeichnet, die aus der Parallelstellung heraus die Sehachsen vor den Augen zur Überschnei-

¹⁸ CRT: Cathode Ray Tube

¹⁹ Sehachse: Verbindungsgerade zwischen dem mit dem Auge fixierten Objekt und dem zugehörigen Fixationsort auf der Netzhaut des Auges [Bok-06]

²⁰ Mitte der Netzhaut mit der stärksten Auflösung

²¹ Retina = Netzhaut

dung bringt, um einen in diesem Schnittpunkt gelegenen Punkt zu fixieren. Die Konvergenz ist somit v. a. für das Nahsehen wichtig.

Die Akkommodation passt die Augenoptik an wechselnde Sehentfernungen v. a. durch Formveränderung der Linse an [Hau-94]. Sie bestimmt die Entfernung, in welcher das virtuelle Bild scharf zu sehen ist bzw. auf welche sich das menschliche Auge einstellen muss, um das Bild scharf zu sehen (Akkommodationsentfernung) [Mel-97]. Die Optik von HMDs bildet das Display in einer festen Entfernung vor dem Auge, der sogenannten virtuellen Bildweite ab [Rot-04]. Ein gleichzeitiges Scharfstellen auf das reale und das virtuelle Objekt ist nur dann möglich, wenn sich die Projektionsfläche in gleicher Entfernung befindet wie das reale Objekt [Oeh-04]. Üblicherweise erscheint das reale Bild in verschiedenen Entfernungen vor dem Benutzer, während das virtuelle Objekt in einer fixen Distanz vor dem Benutzer angezeigt wird, so dass das Auge auf zwei Entfernungen gleichzeitig fokussieren müsste, was physikalisch nicht möglich ist [Ham-06]. Dieser Vorgang erfordert eine Trennung der natürlichen Beziehung zwischen Konvergenz und Akkommodation und kann zu Augenschmerzen, Ermüdung und Veränderungen des visuellen Systems führen [Pel-01]. Beim Nahsehen müssen die Muskeln angespannt werden, was mit Beanspruchung verbunden ist [Oeh-04]. HMDs mit großen Akkommodationsentfernungen sind für Montagearbeiten (normal in ca. 40 bis 60 cm Entfernung) nicht geeignet, weil ein Konflikt entsteht, ob auf das reale oder das virtuelle Objekt akkommodiert werden soll [Oeh-97]. Reale und virtuelle Daten sollen unterscheidungsfrei wahrgenommen werden; ist dies nicht der Fall, kann es zu folgenden Problemen kommen [Alt-03]:

- Ermüdung des Menschen durch häufig wechselnde Konzentration zwischen virtuellem und realem Objekt (wechselnde Wahrnehmungsebenen)
- häufige Anspannung der Augenmuskeln zur Akkommodation
- störender Einfluss des virtuellen Objekts bei Betrachtung des realen Objekts u. u.

Die Okularität ist für das räumliche Sehen mitverantwortlich. Es können sehr feine Tiefeninformationen innerhalb einer kurzen Entfernung von ca. einem Meter, aber auch die relative Entfernungsinformation eines Objekts, das viel weiter weg liegt, unterschieden werden [Mel-97]. Für die Vermittlung eines Tiefeneindrucks gibt es stereoskopische und monoskopische Mechanismen, wobei stereoskopische Faktoren in

widersprüchlichen Situationen normalerweise über die monoskopischen dominieren [Hau-94].

Bei der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung wird jedem Auge ein separates, unabhängiges Bild zugänglich gemacht (binokular) [Oeh-04]. Die Wahrnehmung der Tiefe hängt wesentlich, aber nicht ausschließlich mit der Überlappung der zu den beiden Augen gehörenden Sehfelder und der Integration der entsprechenden Informationen zusammen [Hau-94]. Neben dieser durch den Augenabstand bedingten relativen Verschiebung der beiden Abbildungen auf den Netzhäuten (Disparität oder laterale Verschiebung) trägt die Vergenz zur Stereoskopie bei. Binokulares Sehen ist bis zu einer Entfernung von ca. zehn Metern möglich [Oeh-04], weil aufgrund der Entfernung die Bilder für beiden Augen nahezu identisch sind.

Bei weiter entfernten Objekten übernehmen die monoskopischen Faktoren die Tiefenwahrnehmung durch Ableitung der Tiefeninformationen aus einem monokularen zweidimensionalen Retinabild. Dies erfolgt teilweise durch die gleichen zentralnervösen Faktoren, die auch bei der Erstellung von 2D-Bildern benutzt werden ([Alt-03], [Bow-05], [Hau-94], [Oeh-04]).

- Verdeckung: verdeckte Objekte erscheinen weiter hinten
- Verschwommenheit: vernebelte Objekte liegen weiter weg
- Größenkonstanz: durch die relative Größe der Objekte zueinander scheint beispielsweise ein kleinerer Kreis weiter weg zu sein als ein größerer
- Perspektivstruktur: Fluchtpunktperspektive, Luftperspektive, relative Höhe über dem Horizont
- Schattierung, Farben (nahes Objekt hat kräftigere Farben)
- Bewegungsparallaxe: Durch die Bewegung des Auges ändern sich die tiefenstaffelten Bilder, so dass weniger bewegte Bilder benötigt werden. Nahe Objekte scheinen schneller zu sein.

Des Weiteren lassen sich die Sichtbereiche des Menschen unterscheiden. Das Gesichtsfeld ist der Bereich der Umgebung, der ohne Bewegung von Kopf und Augen gleichzeitig wahrgenommen werden kann. Scharf sehen kann man innerhalb eines Gesichtsfeldes jedoch nur in einem Bereich, der um 1 bis 2° um die Sehachse liegt [Bok-06]. Das periphere Gesichtsfeld umfasst die äußeren Netzhautanteile und hat

deshalb nur eine geringe Sehschärfe, aber eine hohe Warnfunktion für schnelle Bewegungen. Wird dieser Bereich beeinträchtigt, können z. B. im Produktionsbereich schnelle Objekte wie Gabelstapler schlechter erkannt werden [Oeh-04]. Das Blickfeld ist der Wahrnehmungsbereich bei ruhendem Kopf aber mit bewegten Augen ([Bok-06], [VDI3657]) und somit der für den HMD-Einsatz interessante Bereich. Beim HMD müssen die Augen die Umgebung zuerst abtasten, bevor der Kopf nachzieht (v. a. bei kleineren Winkeln) [Lar-02]. Das menschliche monokulare Blickfeld liegt bei 160° horizontal (Außenseite 100° , Innenseite zur Nase 60°) und 115° bis 120° vertikal. Die beiden monokularen Blickfelder überlappen sich, so dass sich das binokulare horizontale Blickfeld auf 180° bis 200° erweitert ([Mel-97], [VDI3657]). Das Umblickfeld beinhaltet Bewegungen der Augen und des Kopfes [Bok-06].

Okularität

Datenbrillen lassen sich hinsichtlich der Okularität in monokulare, biokulare und binokulare Geräte einteilen (siehe Abbildung 3-6). Die binokularen Eigenschaften des menschlichen Sehens sind für alle drei Formen wichtig [Cak-06].

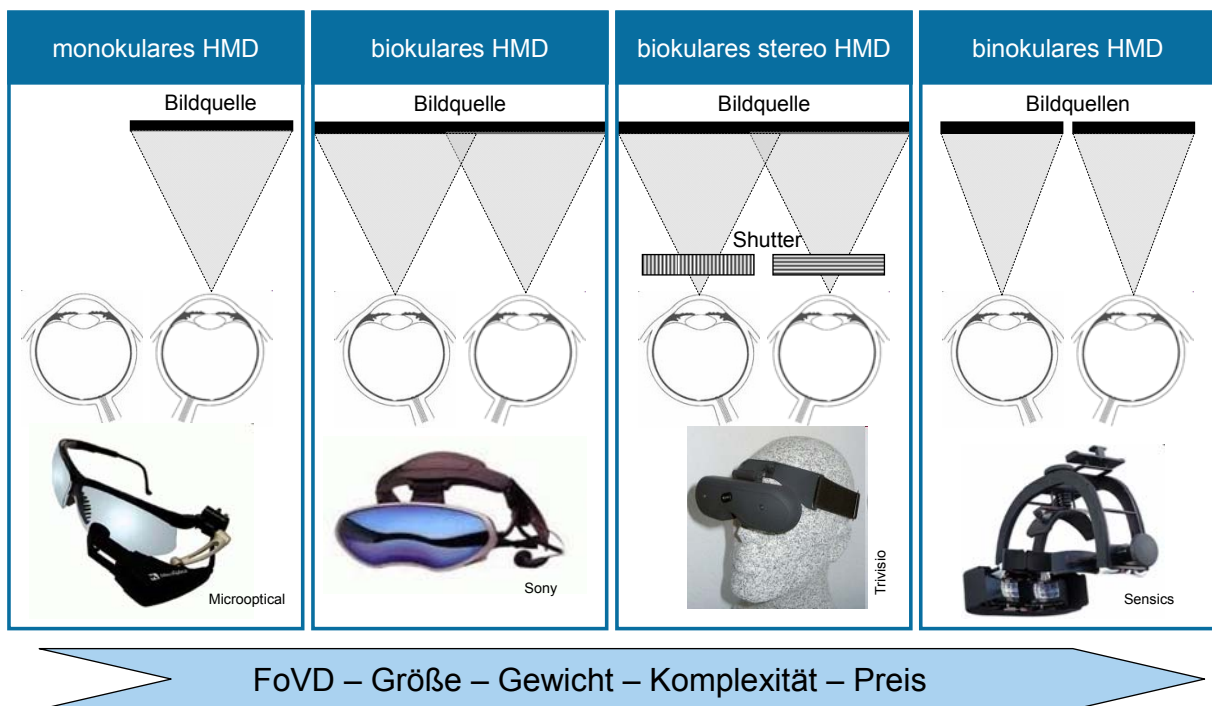


Abbildung 3-6: Einteilung der Datenbrillen nach Okularität

Bei monokularen HMDs gibt es nur eine Bildquelle für ein Auge. Der Vorteil liegt darin, dass das zweite Auge die Umgebung in voller Sehschärfe wahrnehmen kann. Da nur für ein Auge die Optik nötig ist, lässt es sich leichter bauen, ist billiger und einfa-

cher als die HMDs, die beide Augen abdecken. Der Nachteil ist, dass keine stereoskopische Darstellung möglich ist. Ein räumlicher Eindruck kann durch genaue Kenntnis des vorliegenden Raumes bzw. durch Seherfahrung und durch Aspekte des monokularen räumlichen Sehens gewonnen werden [Oeh-04]. Der Mensch besitzt ein dominantes Auge, wobei dieses keinen bekannten Zweck hat. Für die Anwendung von monokularen HMDs ist es somit gleichgültig, vor welchem Auge das Display angebracht wird [Map-03]. Es kann eine binokulare Rivalität²² auftreten, weil ein Auge das um virtuelle Objekte angereicherte, reale Bild und das andere Auge nur die reale Umgebung wahrnimmt [Ham-06]. Dies führt zu alternierenden Perioden monokularer Dominanz, d. h. dass das Gehirn abwechselnd das Bild eines Auges bevorzugt. Diese Phasen dauern ein bis zehn Sekunden. Da der Mensch keine bewusste Kontrolle der binokularen Rivalität hat, kann es zu einer Verringerung der visuellen Leistung kommen [Lar-02]. Manche Benutzer schließen beim Fokussieren das andere Auge. Allerdings geben andere Quellen die Vermutung an, dass sich der Mensch daran gewöhnt, wobei weitere Langzeituntersuchungen nötig sind. Ein weiteres Problem ist, dass mit einem Auge ständig zwischen dem virtuellen Bild und der Realität gewechselt wird. Dies kann zu einer kurzzeitigen Veränderung der Phorie²³ führen. Dieses Phänomen ist bei anderen monokularen Geräten, wie z. B. Mikroskopen auch bekannt [Lar-02]. Befindet sich das Display nur im peripheren Blickfeld, ist binokulares Sehen weiter möglich [Pel-90]. Ob all diese Folgen vernachlässigbar sind, lässt sich nicht sagen. Es ist jedoch aufgrund der Existenz in diese Richtung gehender Forschung anzunehmen, dass sie eine gewisse Bedeutung haben.

Bei biokularen HMDs werden mit einer Bildquelle beide Augen angesprochen²⁴. Da es nur eine Bildquelle gibt, ist keine räumliche Darstellung möglich. Tiefeninformationen können durch monokulare Sichtmechanismen erzeugt werden. Durch die Integration von Shutter-Gläsern können beide Augen abwechselnd verdunkelt und ein stereoskopischer Effekt durch für beide Augen getrennte Strahlengänge erzeugt

²² Binokulare Rivalität ist ein Wahrnehmungskonflikt, wenn beide Augen sehr verschiedene Stimulationen/Bilder erhalten [Cak-06].

²³ Phorie: die Richtung des Blickes, wenn es nichts zu erblicken gibt (längere Verdeckung eines Auges, nur ein Auge fokussiert die virtuellen Informationen). Mehrere Quellen geben ein Verstellen der Phorie durch Benutzen eines HMD an, die aber bereits kurze Zeit nach dem Tragen des HMD wieder verschwand [Lar-02].

²⁴ Biokular heißt auch, dass jedes Auge ein eigenes Display hat, die angezeigten Bilder aber zu 100 % überlappen, d. h. auf beiden Displays wird das gleiche Bild wiedergegeben.

werden [Alt-03]. Die binokulare Rivalität spielt keine Rolle [Mel-97], aber biokulare HMDs erzeugen mehr Diskomfort, weil beide Augen ein Bild sehen [Azu-97]. Bei diesen Brillen ist vor allem auf das virtuelle Blickfeld und die Verdeckung des realen Blickfeldes sowie das höhere Gewicht zu achten.

Binokulare HMDs besitzen zwei Bildquellen für separate, optische Strahlengänge vor den Augen für die Erzeugung eines echten 3D-Bildes mit Tiefenwahrnehmung. Die Bauweise ist schwer, komplex und teuer. Außerdem ist eine genaue Berechnung und Kalibrierung (individueller Augenabstand, Überlappung der beiden Bilder) durchzuführen. Ein weiteres Problem ist meist die extreme Einschränkung der Sicht auf die reale Umgebung. Bei binokularen Displays überschneidet sich das Blickfeld der beiden monokularen Displays, d. h. dass das gesamte Blickfeld nicht gleich der Summe der beiden einzelnen Blickfelder ist. Dies ist ein Grund, weshalb eine genaue Berechnung der Szene und Kalibrierung notwendig sind [Mel-97]. Der Abstand zwischen dem linken und rechten Display muss an den individuellen Pupillenabstand des Menschen, der zwischen 50 und 76 mm variieren kann, angepasst werden können [Oeh-04].

Field of View

Das Field of View (FoV) ist zusammen mit der Auflösung die wichtigste Größe für die Bewertung von HMDs. Unter FoV wird die maximale Größe des Bildes verstanden, in dem ein HMD Informationen darstellen kann (FoV Display, FoVD) bzw. in welchem ein Durchschauen auf die reale Szene möglich ist (FoV Environment, FoVE) (siehe Abbildung 3-7). Das Anzeigegerät vor dem Auge kann durch seine Geometrie Teile des menschlichen Blickfeldes verdecken, so dass das FoVE nicht identisch mit dem realen Blickfeld ist. Beim FoVD kann der horizontale, der vertikale und/oder der daraus berechenbare diagonale Winkel in Grad angegeben werden. Kein existierendes HMD erreicht das gesamte Blickfeld des Menschen. Das FoVD sollte in horizontaler Richtung 150° und in vertikaler Richtung 60° betragen [Pat-04], wobei derzeitige HMDs nur 30 % des menschlichen Blickfeldes abdecken [Küc-03]. Bei einem kleinen FoVD muss der Mensch seinen Kopf öfter bewegen, d. h. es ist mehr Zeit für die Informationssuche nötig, was zu Diskomfort und Desorientierung führt [Mel-97]. Ein weites FoVD reduziert Kopfbewegungen zur Informationssuche, so dass dies mit Augenbewegungen erfolgt [Woo-03]. Der Bereich des schärfsten Sehens ist in der Fovea die durch ein kleines FoVD abgedeckt ist. Das für die Orientierung verantwort-

liche periphere Gesichtsfeld ist eingeschränkt, was Unsicherheiten bei der Bewegung in der realen Umgebung hervorrufen kann [Röh-95]. Das FoVD ist durch die Befestigung am Kopf eine konstante Größe, weil sich der Abstand Auge zu Display nicht ändert. Da das FoVD aufgrund verschiedenster Herstellerangaben meist schlecht vergleichbar ist, kann das FoVD normiert werden, indem der Winkel auf ein Pixel bezogen wird [BeM-06]. Das FoVD für monokulare HMDs lässt sich nach Formel 3-1 berechnen. Bei binokularen Displays ist der Überdeckungsbereich zu beachten.

$$FoVD [^\circ] = 2 \times \arctan \frac{Displaydiagonale [mm]}{Brennweite der Linse [mm]}$$

Formel 3-1: Berechnung des FoVD für monokulare HMDs [Mel-97]

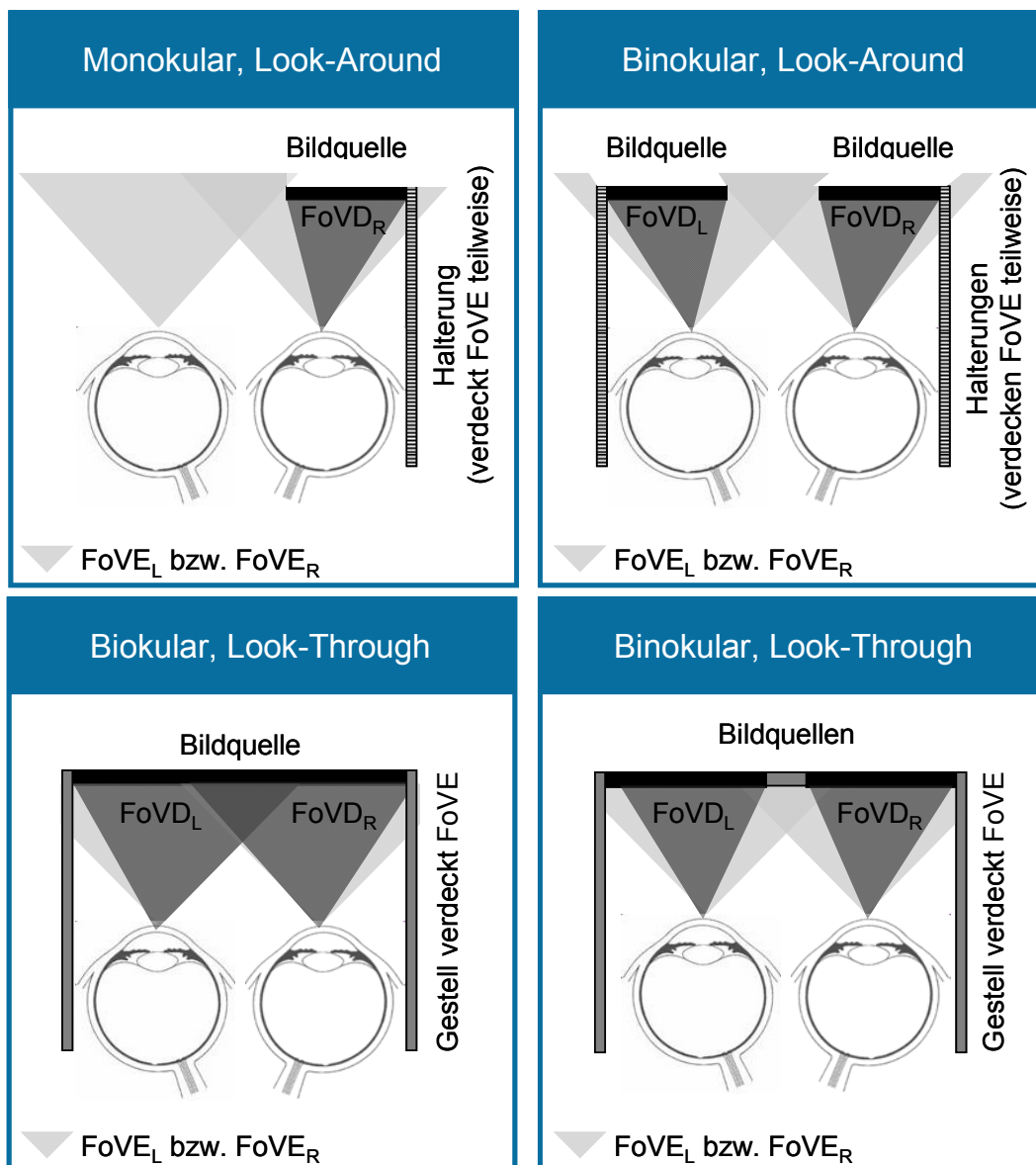


Abbildung 3-7: FoVD und FoVE in Abhängigkeit der Bauart

Bauarten

Datenbrillen lassen sich in die beiden Bauformen Look-Through- (Durchsichtssysteme) und Look-Around-HMD (Umsichtsysteme) unterteilen (siehe Abbildung 3-7). Look-Through-HMD zeichnen sich dadurch aus, dass der Benutzer seine Umwelt nur durch das HMD wahrnimmt und das gesamte Blickfeld vom HMD bedeckt ist. Das FoVE reduziert sich bei bio- und binokularen HMDs auf das technisch verfügbare FoVD. Sie lassen sich weiter unterteilen in OST- und VST-HMDs (siehe Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9). Bei Look-Around-Geräten wird nur ein Teil des Blickfeldes vom HMD verdeckt. Dabei handelt es sich meist um monokulare HMDs, und die Verdeckung erfolgt durch einen kleinen, meist auf einem Brillengestell montierten Monitor (VST), auf dem das um virtuelle Informationen erweiterte Kamerabild dargestellt wird. Das FoVD ist viel kleiner als das FoVE. Es existieren aber auch Look-Around OST-HMD, worunter Virtual Retinal Displays (VRD) eine Spezialform darstellen, die mit Hilfe eines Laserstrahls, der über Spiegel und einen Strahlenteiler abgelenkt wird, das Bild direkt auf die Netzhaut projizieren [Tid-95].

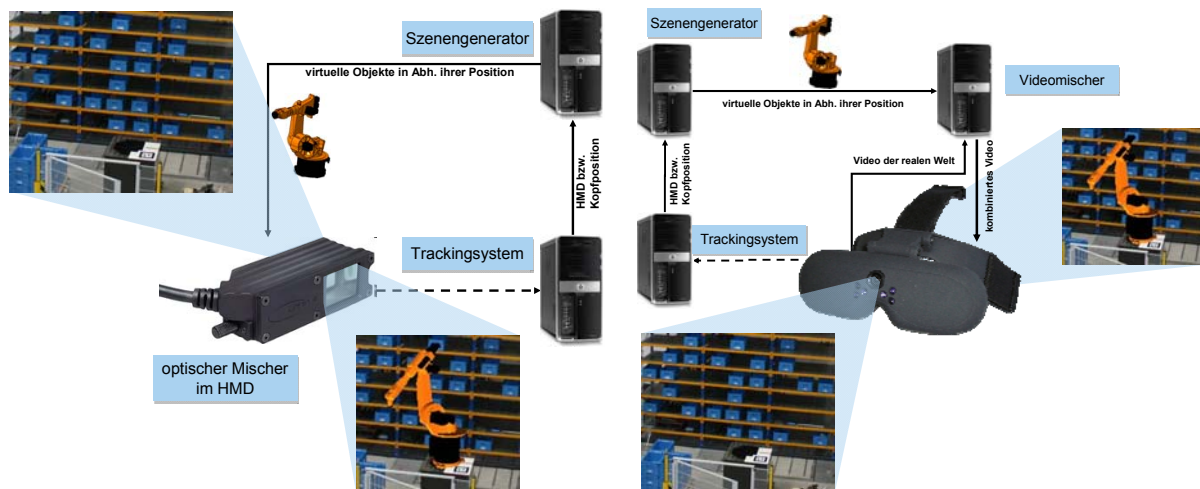


Abbildung 3-8: OST

Abbildung 3-9: VST

Die meisten OST-HMD haben eine fest eingestellte virtuelle Objektebene, die nicht unbedingt mit der Objektweite des realen Objekts übereinstimmt. Durch die ungleichen Entfernungen und somit Winkel bei der Fokussierung entsteht ein unterschiedlicher Vergenzaufwand für die Augen [Alt-03]. Eine automatische Anpassung der Objektebene wäre wünschenswert (z. B. [Liu-03]). Für VST stellt dies kein Problem dar. Ein weiterer Nachteil von OST ist, dass durch den halbdurchlässigen Spiegel die Realität dunkler wahrgenommen wird. Datenbrillen unterliegen Bewegungen der Gesichtsmuskulatur, so dass sie verrutschen können. Bei OST ist dadurch eine erneute

3 Stand der Technik zur Augmented Reality

Kalibrierung zwischen Auge und Display notwendig (siehe Kapitel 6.2.2). Es gibt Ansätze durch die Integration eines Eye-Trackers, eine automatische Nachkalibrierung zu ermöglichen, so dass das OST HMD nur einmal pro Benutzer kalibriert werden muss [Sut-06]. Der Nachteil von VST ist, dass der Benutzer die Realität nur durch die Datenbrille wahrnimmt und damit das FoVE sehr eingeschränkt sowie die Auflösung der realen Welt niedrig ist. Die Ausgabe des Videobildes erfolgt mit einer Latenzzeit, so dass es zur Cyber Sickness kommen kann. Einen zusammenfassenden Vergleich von OST und VST bietet Tabelle 3-2.

Verfahren Kriterium	OST	VST
Einfachheit	+ nur ein Videostrom (virtuell)	- Synchronisation von zwei Videostreamen
	- komplexe Bildquelle (z. B. Laserprojektion)	o
Kombination real - virtuell	- <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lichteinflüsse nicht ausschaltbar ▪ virtuelle Objekte erscheinen oft zu blass ▪ Umgebung erscheint durch halbdurchlässigen Spiegel zu dunkel („Sonnenbrillen“-Effekt) 	+ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Lichteinflüsse ausschaltbar ▪ Tiefenwahrnehmung abbildbar ▪ Farbechtheit hängt von Display ab
Verdeckung	- ohne zusätzliche Hardware werden virtuelle Informationen immer im Vordergrund dargestellt	o Verdeckung einfacher zu realisieren
Auflösung	+ nur Beschränkung der Auflösung der virtuellen Daten	- Beschränkung der Auflösung der realen Umgebung und der virtuellen Daten
FoVD	- bis 70° horizontal	+ bis 120° horizontal
FoVE	+ keine / kaum Einschränkung	- klein; bei Look-around größer
Verzerrung	o minimale, nicht wahrnehmbare Effekte durch die Glasplatte vor dem Auge	o Herausrechnen der Verzerrung
Eye-Offset ²⁵	+	- Sicht der Kamera meist ungleich der Sicht der Augen
Latenzzeit	- Hinterherhinken der virtuellen Information hinter der Realität	- Hinterherhinken der gesamten Szene
		+ Synchronisation von real und virtuell
Kalibrierungs- aufwand	- nach jedem Aufsetzen oder Verschiebung zwischen Auge und Display	+ einmalig
Tracking	o	+ mögliche Verwendung der Kamera
Sicherheit	+	- Geschlossen, kein automatisches Fail-Safe-Prinzip
Auswirkungen auf Menschen	+	- Cyber Sickness möglich (Latenz zur Realität, Eye-Offset)

Tabelle 3-2: Vergleich von OST und VST

²⁵ Blickpunkt der Kamera(s) fällt mit den der Augen nicht überein.

Auflösung

Die Auflösung ist neben dem FoV das wichtigste Bewertungskriterium für HMDs. Unter der Auflösung wird die Anzahl der Pixel pro Grad des FoVD verstanden [Mel-97]. Die Auflösung hängt unmittelbar mit dem FoVD zusammen und wird in horizontal und vertikal unterteilt. Der Abstand zum Bildschirm spielt ebenfalls eine Rolle, denn je näher der Bildschirm am Auge ist, desto eher werden noch die einzelnen Pixel erkannt [Bow-05]. Es gibt verschiedenste Wege die Auflösung zu berechnen (z. B. Formel 3-2).

$$\text{Auflösung [}^\circ/\text{Pixel]} = \frac{\text{FoVD [}^\circ\text{]}}{\text{Anzahl Bildpunkte [Pixel]}}$$

Formel 3-2: Berechnung der Auflösung eines HMDs

Um HMDs zu vergleichen, ist es wichtig zu wissen, welche Zählmethode für die Bildpunkte verwendet wurde. Bei farbigen Displays können alle Pixel oder wegen der drei Farben (rot, gelb, blau) nur jedes dritte gezählt werden [Alt-03]. Deshalb haben monochrome Displays oft eine bessere Auflösung. Unabhängig von der Berechnung lässt sich sagen, dass ein HMD umso besser ist, je näher die Auflösung am entsprechenden visuellen Limit (z. B. der Sehstärke des Benutzers) liegt. Sollen Bildpunkte der Quelle nicht mehr einzeln wahrgenommen werden, so muss die Auflösung stets so hoch wie die menschliche Sehschärfe in der Fovea von ca. einer Bogenminute sein.

Bildwiederholfrequenz

Unter Bildwiederholfrequenz wird die Vertikalfrequenz, d. h. die Anzahl Bilder, die pro Sekunde komplett neu aufgebaut werden, verstanden. Ab einer Bildwiederholfrequenz von 70 bis 80 Hz ist das Bild für den Menschen flimmerfrei [Oeh-04]. 70 Hz sind für eine Auflösung von 1.024 x 768 Pixel nötig. Für 70 Hz bei einer Auflösung von 1.024 x 768 Pixel müsste der Laser bei einem VRD 70 x 768 Bildpunkte pro Sekunde abfahren, d. h. er müsste 53.760 Zeilen pro Sekunde aufbauen. Bei VRD liegt die Bildwiederholfrequenz aufgrund technischer Probleme wie z. B. der Trägheit des Spiegels nur bei 60 Hz, so dass sie deshalb nur mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel ein flimmerfreies Bild erreichen. CRT verfügen über 70 bis 80 Hz und

bei LCD²⁶ spielt die Bildwiederholfrequenz keine so große Rolle, da sie nur die Frequenz angibt, mit der die einzelnen Pixel neu angesteuert werden [Oeh-04]. Zu beachten ist, dass die Bildwiederholrate nur angibt, wie schnell das Ausgabegerät das Bild auf dem Display aus dem Bildspeicher aktualisiert. Dazu muss der Szenengenerator dieses Bild ebenso schnell in den Bildspeicher platzieren [Bow-05].

Bildqualität

Die Bildqualität, d. h. die Schärfe und der Kontrast, ist gleichermaßen durch die Auflösung des Mikrodisplays und die Qualität der Optik bestimmt [Ede-05]. Der Kontrast und die Helligkeit sollten hinsichtlich der Umgebungsbedingungen, aber auch hinsichtlich des Benutzers (Alter, Sehschwäche etc.) einstellbar sein [Oeh-04].

Chromatik

Die Chromatik gibt die Farbtiefe für die farbliche Darstellung wieder. Der Mensch hat im Auge drei unterschiedliche Zäpfchen, die für Licht unterschiedlicher Wellenlänge empfindlich sind (rot, grün, blau), die Farben im Wellenlängenbereich von 380 bis 760 nm wahrnehmen ([Oeh-04], [Mel-97]). Ein Bit umfasst die monochromatische Ausgabe in einer Wellenlänge. Typische Werte sind 4 bis 32 Bit, d. h. 16 bis 16.777.216 Farben. Der Vorteil eines monochromen OST ist, dass der halbdurchlässige Spiegel nur eine Farbe/Wellenlänge reflektieren muss. Bei farbigen muss er mehrere reflektieren, so dass der Spiegel dunkler und der Transmissionsgrad kleiner wird [Azu-01a] und teilweise unter 50 % beträgt [Sut-06].

Ergonomie

Neben den visuellen Kriterien ist ein ergonomischer Tragekomfort für eine hohe Benutzerakzeptanz wichtig. Datenbrillen müssen über die gesamte Arbeitstätigkeit ohne Beeinträchtigungen getragen werden können. Dies muss nicht unbedingt eine Tauglichkeit von einer Schicht von acht Stunden umfassen, denn es gibt genügend Tätigkeiten, die keine dauerhafte Unterstützung erfordern. Die entscheidende Größe ist die Massenverteilung in Relation zum Schwerpunkt des Kopfes [Rot-04]. Dafür ist ein geringes Gewicht und eine in der Hauptträgheitsachse des Kopfes liegende Schwerpunktlage nötig, um das Haltemoment (statisches Moment) in der Nackenmuskulatur

²⁶ LCD: Liquid Crystal Display

so gering wie möglich zu halten [Oeh-04]. Wünschenswert ist deshalb ein nach hinten verlagerter Schwerpunkt, um eine gleichmäßige Gewichtsverteilung auf Nase und Ohren zu erreichen [Fri-04]. Bei gleichem Gewicht ist ein System umso komfortabler, je näher der Schwerpunkt am Kopfbereich liegt. Der Benutzer darf das Tragen nicht als störend oder hinderlich empfinden und es dürfen keine Beeinträchtigungen wie Druckstellen auftreten [Oeh-04]. Datenbrillen müssen entweder mit der normalen Brille tragbar oder auf die Sehstärke einstellbar sein. Für den industriellen Einsatz sollte auf Kabel verzichtet werden oder eine Integration in die Arbeitskleidung erfolgen. Die Position des HMD muss einfach auf die Augen justierbar und diese Position stabil gegenüber Störgrößen im Arbeitsprozess sein [Oeh-04]. Je mehr Einstellmöglichkeiten, desto besser ist das HMD an den Benutzer anpassbar, aber desto länger dauert auch der Einstellvorgang. Ein universelles HMD-Design ist meist mit einem hohen Gewicht verbunden, weil eine große Optik mit automatischer Einstellung nötig ist [Rot-04].

3.2.2 Trackingsystem

Tracking ist der Prozess, um die Position und die Orientierung des Benutzers jederzeit zu messen [BaG-04]. In diesem Kapitel wird ein Einblick in wichtige Aspekte und Technologien gegeben.

3.2.2.1 Definition

Die wichtigste Anforderung an AR ist, die Positionierung der realen und virtuellen Objekte zueinander, weil sonst die Illusion verloren geht, dass beide zusammengehören (Registration Problem). Ein Tracker ist ein Sensor, der die Position und / oder die Orientierung²⁷ messen kann [Wag-05]. Dabei wird die Pose des Anwenders oder des realen Objekts bzgl. eines Bezugskordinatensystems festgestellt, um einen Rückschluss auf den genauen Ausschnitt vom Sichtfeld des Betrachters zu ziehen [Alt-03]. Diese Daten dienen als Grundlage für die örtlich und zeitlich richtige Einbettung der virtuellen Informationen in die reale Szene [Oeh-04]. Der Einsatz eines Trackingsystems erfordert eine Registrierung²⁸, d. h. das Vermessen der absoluten Po-

²⁷ Die 3D-Position mit der räumlichen Orientierung wird Pose genannt.

²⁸ Die Begriffe Registrierung und Kalibrierung werden in diesem Zusammenhang synonym verwendet.

sition des Trackingsystems zur Position des Anwenders (meist Augenposition), um die virtuellen Objekte in der richtigen Perspektive (Blickrichtung des Anwenders) anzuzeigen.

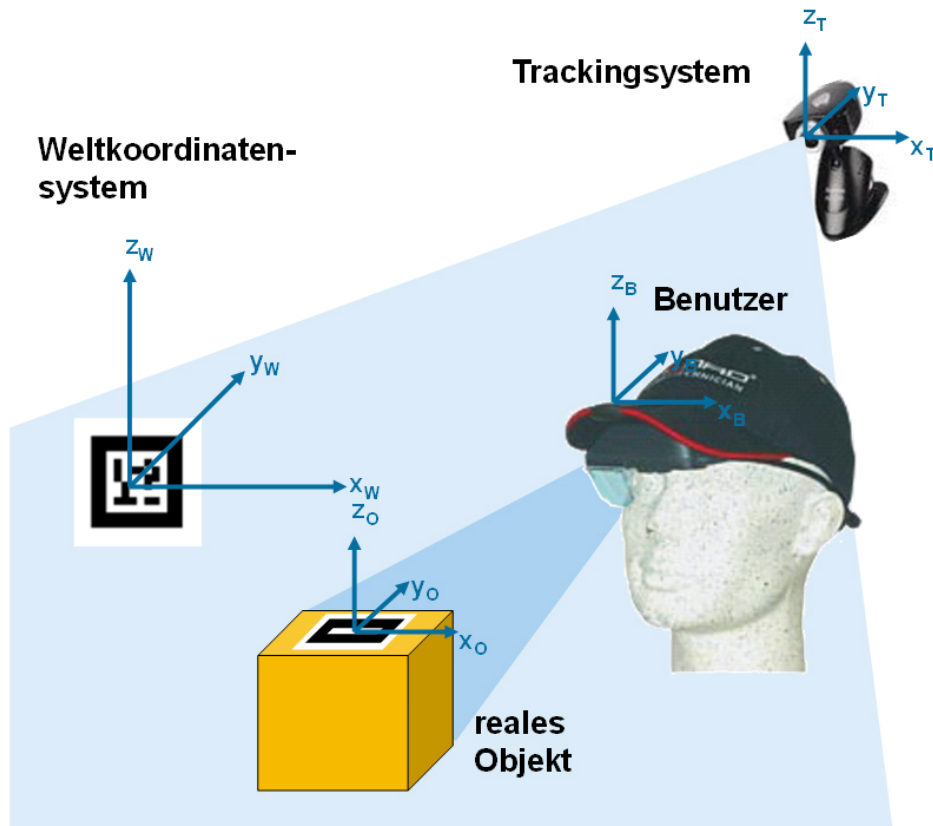


Abbildung 3-10: Aufbau eines Trackingsystems

Beim Tracking von Benutzern bzw. realen Objekten wird jedem ein eigenes Koordinatensystem (COS) zugewiesen (Benutzer- oder Objekt-COS), deren Position zu einem fixen Weltkoordinatensystem (Welt-COS) berechnet wird (siehe Abbildung 3-10). Wird die Pose des Benutzer- bzw. Objekt-COS absolut zum Welt-COS bestimmt, wird dies weltzentriert (world centered) genannt. Die relative Pose eines Objekts zu einem Benutzer heißt objektzentriert (object centered). Diese beiden Begriffe können auch für die Einteilung von Trackingsystemen in inside-out, outside-in und inside-in verwendet werden [Fer-91] (siehe Abbildung 3-11). Bei outside-in stehen die Sensoren an einer festen Positionen zum Welt-COS und die Referenzen bewegen sich im Raum, während sich bei inside-out die Sensoren zum Welt-COS bewegen und die Referenzen in einer festen Position zum Welt-COS befinden. Bewegen sich sowohl der Sensor als auch die Referenz im Raum, wird von inside-in gesprochen.

Bei inside-out liegen die Vorteile der Systeme in der hohen Beweglichkeit des Anwenders, den geringen Kosten (wenige Sensoren) und darin, dass man die winkelige Orientierung des Anwenders mit großer Genauigkeit schätzen kann. Der Vorteil von inside-out gegenüber outside-in ist die hohe Genauigkeit entlang der x- und y-Achse im Gegensatz zu geringen Genauigkeit in der z-Achse (der Tiefe) ([BaM-07], [Pus-08]). Vorteile von outside-in gibt es insbesondere hinsichtlich der hohen Genauigkeit und Geschwindigkeit der Positionsbestimmung. Die Systeme sind allerdings teuer.

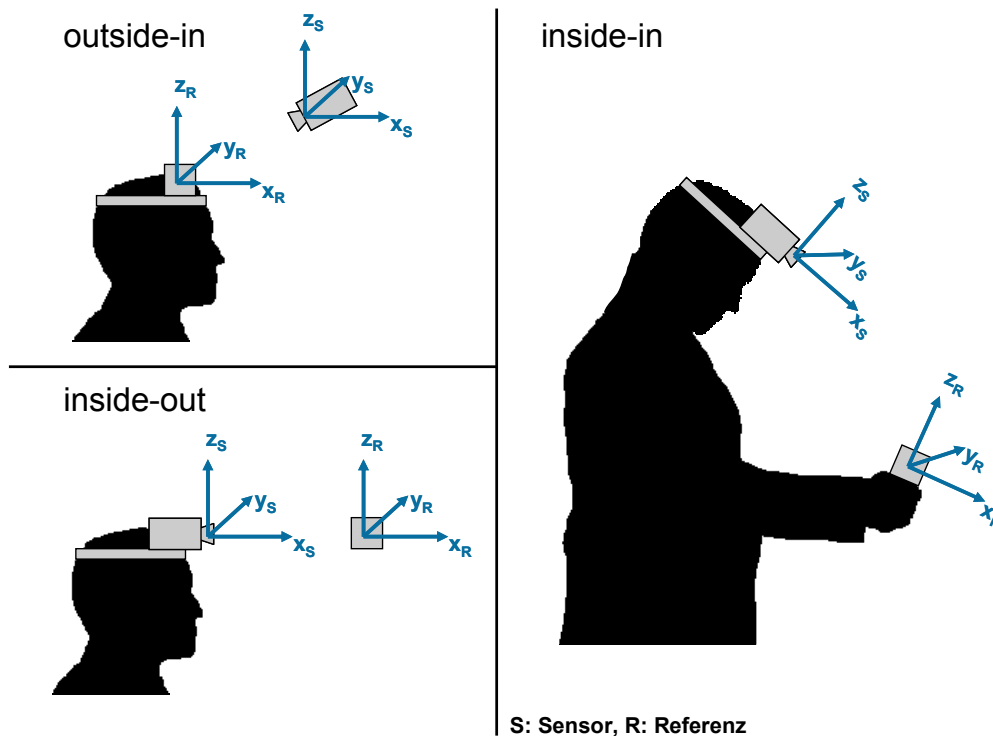


Abbildung 3-11: Outside-in, Inside-out und inside-in Tracking

3.2.2.2 Anforderungen

Die unterschiedlichen Trackingverfahren lassen sich durch die Kriterien Genauigkeit, Latenzzeit, Freiheitsgrade, Robustheit und Messraum klassifizieren.

Genauigkeit

In Abhängigkeit von der Art der Anwendung und der gewünschten Visualisierung sind unterschiedlich genaue Auflösungen der Trackingdaten notwendig. Eine kongruente Überlagerung stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Messergebnisse während für die nicht kongruente Überlagerung eine grobe Bestimmung der Position oft ausreichend ist [Fri-04]. Winkelfehler sind beim Einsatz von HMDs be-

sonders kritisch, denn kleine Fehler im Tracking vergrößern sich auf der virtuellen Objektebene, die sich in einem gewissen Abstand vor dem Benutzer befindet. Aufgrund der Genauigkeit kann in Grob- (3 bis 10 m) und Feintracking (± 1 mm Genauigkeit) unterschieden werden [Alt-03].

Latenzzeit

Eine geringe Latenz der Trackingdaten ist für eine Überlagerung der Realität mit virtuellen Objekten von großer Bedeutung (siehe Kapitel 3.2). Echtzeittracking ist unerlässlich, wenn die Synchronisation der realen und der virtuellen Welt im kleinstmöglichen Zeitintervall erreicht werden muss [Ong-04]. Durch eine hohe Latenz können dynamische Genauigkeitsfehler entstehen („Hinterherschwimmen“ der virtuellen Daten). Für die Latenzzeit spielt die Updaterate, d. h. die Anzahl der Aktualisierungen der Sensordaten pro Sekunde, ebenfalls eine wichtige Rolle.

Freiheitsgrade

Als DoF (Degrees of Freedom) wird die Anzahl der durch das Tracking ermittelten Parameter bezeichnet. Dabei entspricht jeder erfasste Parameter einem Freiheitsgrad. Ein Trackingverfahren, das Position und Orientierung im dreidimensionalen Raum liefert, hat sechs Freiheitsgrade (6-DoF). Für die nicht kongruente Visualisierungsart können beispielsweise auch Systeme mit zwei DoF (z. B. Position in einer Ebene über die x- und y-Koordinaten) eingesetzt werden.

Robustheit

Robustheit ist die Fähigkeit des Trackingsystems, unter sich ändernden Umgebungseinflüssen oder bei kurzzeitig fehlenden Messergebnissen bzw. falschen Messungen weiterhin zu funktionieren [Alt-03]. Bei unzuverlässigem Tracking, d. h. bei stark variierenden Messungen, können z. B. Positionssprünge auftreten. „Springende“ virtuelle Objekte können zu einer Unglaubwürdigkeit der AR-Daten beim Benutzer führen, weil diese nicht eindeutig sind. Ausfälle des Trackings bewirken – ähnlich wie bei hoher Latenz – Verzögerungen bei der Überlagerung und ein „Hinterherschwimmen“ der virtuellen Objekte.

Messraum

Der Messraum oder Trackingbereich stellt das Volumen oder die Fläche dar, in dem das System die relative Pose der Trackingobjekte bestimmen kann. Wichtig ist eine

Skalierbarkeit, d. h. dass die Trackingtechnologie bei einer Vergrößerung des Messraums einfach daran angepasst werden kann [Alt-03].

3.2.2.3 Grundprinzipien

Trackingsysteme lassen sich nach mehreren Faktoren einteilen. Nach dem Arbeitsprinzip können Zeit- und Frequenzmessung, Ultraschall, GPS²⁹, optisches Gyroskop, räumliches Scannen, inertial, mechanische Verbindungen, Feldmessungen (Magnetfeldmessung, Magnetometer/Kompass, Messung Gravitationsfeld) unterschieden werden [Rol-01a]. In dieser Arbeit werden die Trackingsysteme nach ihren physikalischen Grundprinzip in akustisch, elektromagnetisch, Funk, inertial, mechanisch und optisch eingeteilt.

Akustisches Tracking

Typischerweise sind bei akustischem Tracking Ultraschall-Transponder an den Objekten angebracht. Ultraschall ist eines der ersten verwendeten Verfahren [Sul-68] und eignet sich für den Einsatz in Gebäuden [Web-96] und Laborumgebungen. Die Ultraschall-Transponder senden für den Menschen nicht hörbare Töne im Ultraschallbereich aus, die von Sensoren (Mikrofonen) empfangen werden. Auf Basis der unterschiedlichen Laufzeiten der Schallwellen zu verschiedenen Empfängern (Laufzeitmessung) oder der unterschiedlichen Phasen der Wellen (Phasenverschiebung) kann die Pose im Raum berechnet werden. Wegen der Schallgeschwindigkeit ist die Latenzzeit gering. Die Genauigkeit hängt von der Schallgeschwindigkeit ab und diese wiederum von Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit etc. [Rol-01a]. Echos beeinflussen das Tracking dahingehend, dass das System entscheiden muss, welche Schallwelle für die Messung entscheidend ist.

Elektromagnetisches Tracking

Ein magnetischer Kompass, der sich am Magnetfeld der Erde ausrichtet, ist ein gebräuchliches System zur Navigation. Beim elektromagnetischen Tracking wird ein elektromagnetisches Feld durch eine Kombination dreier zueinander senkrecht stehender Spulen erzeugt. Der am Objekt befestigte Sensor misst die Stärke des elektromagnetischen Feldes und bestimmt daraus die Pose des Objektes relativ zu der

²⁹ GPS: Global Positioning System

Quelle. Ein Nachteil dieser Systeme ist das starke erzeugte Magnetfeld, das andere Geräte stören kann, bzw. andere ferromagnetische Objekte beeinflussen das Trackingsystem. Ein Sensor deckt einen Bereich mit einem Radius von einem bis zehn Meter ab und erreicht eine Genauigkeit von 0,1 bis 1,5 cm in der Position und 0,1 bei 1,5° in der Orientierung bei Updateraten von 50 Hz ([Bow-05], [Sut-06]).

Funksysteme

Funksysteme sind in Lagerumgebungen bereits erfolgreich im Einsatz, z. B. zur Kommunikation zwischen MDT oder PbV-Systemen mit dem WMS. Allerdings lässt sich damit meist nur die Position des Mitarbeiters, nicht aber seine Blickrichtung bestimmen.

Das bekannteste Funksystem ist das satellitengestützte GPS³⁰, das v. a. für die Navigation von Fahrzeugen aller Art verwendet wird. Die Updaterate von 1 Hz [Tho-00] ist für mobile AR-Anwendungen zu gering. Da für GPS eine freie Sichtverbindung zwischen den Satelliten und dem zu trackenden Objekt nötig ist, eignet es sich nicht für den Einsatz in Lagerhallen.

WLAN (Wireless Local Area Network) ermöglicht die drahtlose Übertragung von Daten in einem Computernetzwerk. WLAN zeichnet sich durch eine relativ hohe Reichweite aus und bietet hohe Datenübertragungsraten (aktuell bis 54 Mbit/s). Ein Beispiel für eine Anwendung im Lagerbereich ist MagicMap, die die Positionsbestimmung per WLAN ermöglicht [Iba-05]. Ein Problem der Anwendung ist, dass durch die Lagereinrichtung die Signalausbreitung nicht homogen ist. Gebäudeelemente wie Stahlträger können elektromagnetische Wellen leiten und so das Feld auf eine unerwartete Weise deformieren. Deshalb kann sich die Position der höchsten Signalstärke von der wirklichen Position unterscheiden. Eine große Anhäufung von Materialien, wie z. B. Eisen zwischen Access Point und Empfänger verursacht eine starke Abschwächung des Signals. WLAN-Systeme funktionieren nur zweidimensional und erreichen im Labor eine Genauigkeit im Meterbereich.

Das System der Fa. Ubisense beruht auf der Ultra Wideband (UWB) Funktechnologie und wird für die funkbasierte Staplerortung auch unter extrem rauen Bedingungen und stark metallischen Umgebungen (z. B. in Metallgießerei) eingesetzt ([Bar-

³⁰ Differentielles GPS (DGPS) erhöht die Genauigkeit durch den Einsatz mehrerer GPS-Empfänger.

08], [Har-08]). Reflexionen, die andere Techniken sehr stören, wirken sich bei UWB kaum aus. Bei diesem outside-in System werden aktiv sendende Tags (= Transponder) von einem Netzwerk fest installierter Sensoren, die aus einer Empfangseinheit und einem Prozessor zur Berechnung der Position bestehen, erfasst. Die Sensoren identifizieren den einfallenden Winkel der Transpondersignale und berechnen den Zeitunterschied der ankommenden Signale zwischen jeweils zwei Sensoren. Mit zwei Sensoren kann die Position eines Tags mit einer Präzision von +/- 15 cm in 3D durch Auswertung der Laufzeitunterschiede und der Winkelinformationen (pro Sensor) ermittelt werden. Die Signalstärke wird nicht zur Berechnung herangezogen. Bei UWB erfolgt die Ortung mit 20 Hz [Bar-08].

RFID bezeichnet die kontaktlose Identifikation durch Funkübertragung. RFID-Systeme bestehen aus einer Lesestation und aktiven (eigene Stromversorgung) oder passiven (drahtlose Energieversorgung über eine Lesestation) Transpondern. Die Stromversorgung beeinflusst ebenso wie die Frequenz die Reichweite. Bei den Tags gibt es zwei Zustände: erfasst und nicht erfasst. Die Lesestation liest mit einer bestimmten Frequenz (z. B. alle 200 ms [Bec-08]) alle Tags aus, die sich gerade erfassen lassen. Da die Position aller RFID-Tags und deren ID bekannt ist, kann mit diesen Daten die Position des Lesegeräts bestimmt werden. RFID kann im Gegensatz zu Infrarotsignalen Wände durchdringen, d. h. dieses Signal ist nicht auf einen Raum beschränkt, und bietet außerdem eine höhere Bandbreite und geringe Kosten. Die Signalstärke kann durch Hindernisse, v. a. aus Metall oder bei Flüssigkeiten, sowie durch die Entfernung beeinflusst werden. Gegenüber typischem AR-Equipment hat RFID eine ziemlich geringe Genauigkeit von 0,5 m [Bec-08] und Updaterate [Wag-05]. RFID wird für den Einsatz in der Logistik immer bekannter. Die Tags sind an Produkten, Verpackungen, Paletten etc. angebracht. Wird RFID durchgängig und umfassend eingesetzt, kann ein RFID-Netz zum Tracking verwendet werden. Die Steuerung von Flurförderzeugen erfolgt in vielen Fällen bereits über RFID-Tags, die im Boden eingelassen sind. Auch wenn in Zukunft Transponder in logistischen Umgebungen zum Alltag gehören, gibt es immer noch die Probleme, dass sie nicht homogen verteilt sind und dass sich in manchen Bereichen noch zu wenige Tags für ein dichtes Feld im Raum befinden [Bec-08]. Mit RFID wurde bereits eine AR-Lösung für Lagerumgebungen entwickelt. Mit Hilfe der Tags und daran integrierter Lichtsen-

soren werden Lagerfächer identifiziert und ein Projektor im Handheld-Gerät hebt die ausgewählte Lagerfächer durch Projektion von Lichtpunkten hervor [Ras-04].

Inertiales Tracking

Inertiale Trackingverfahren messen die lineare bzw. rotatorische Geschwindigkeit und Beschleunigung von Objekten. Durch die einfache (Geschwindigkeit) bzw. zweifache Integration (Beschleunigung) des Messergebnisses erhält man die Position des Objektes im Raum. Gyroskope nutzen das Prinzip der Impulserhaltung, um Kräfte zu bestimmen, mit denen sich die Rotation um eine Achse berechnen lässt. Der größte Vorteil ist, dass keine externen Referenzen nötig sind. Inertiale Sensoren, v. a. Gyroskope, können die Latenzzeit und die Genauigkeit der Orientierung verbessern [Pus-08]. Das inertielle System kann aber nur relative Positionen zu einer Ausgangsposition wiedergeben, so dass es zu Beginn initialisiert werden muss. Deswegen werden inertielle Sensoren in Kombination mit anderen Verfahren eingesetzt (z. B. [Bec-08], [Miy-08]). Eine Initialisierung muss von Zeit zu Zeit wegen des Drifts (Abweichungen) wieder erfolgen. Drift entsteht bei Gyroskopen u. a. dadurch, dass die Achse wegen der Reibung zwischen dem Rad und den Lagern nicht parallel zur Rotationsachse bleibt. Damit ist die Achse nicht mehr parallel zur Erdachse, der Referenz [Rol-01a]. In Kombination mit anderen Sensoren kann der Drift reduziert werden, der der Hauptgrund für Fehler bei inertiell Tracking ist. Gyroskope werden als outside-in (Gyroskop an Objekt, das von einem outside-in Trackingsystem erfasst wird) und inside-out System (Kamera und Gyroskop auf Benutzer) eingesetzt [Pus-08].

Mechanisches Tracking

Mechanisches Tracking war das erste entwickelte Trackingverfahren. Der für die Positionsbestimmung vorgesehene Gegenstand ist mit einem mechanischen System fest verbunden [Sul-68]. Dieses System besteht aus einer Kombination verschiedener Gelenke und Ausleger und ähnelt einem Roboterarm. An jedem Gelenk sind Sensoren (Winkelgeber, Potentiometer) angebracht, die Bewegungen des jeweiligen Auslegers messen. Die physische Verbindung mit dem fixen Referenzobjekt beschränkt allerdings die Reichweite drastisch und eignet sich daher nur für bestimmte Arten von Systemen. Es ist das genaueste Verfahren und erreicht eine Auflösung von 0,03 mm in der Position und 0,0001° in der Rotation [Sul-68]. Wird eine Kamera

bewegt und ist deren Pose für die Anwendung wichtig, kann sie an einen mechanischen Messarm gehängt werden [Mer-08].

Optisches Tracking

Der wichtigste „Sensor“ des Menschen zur Positionsbestimmung ist das Auge [Wag-05]. Bei optischen Trackingverfahren wird der Wirkungsbereich von den Aufnahmezonen einer oder mehrerer Kameras abgedeckt, die künstliche Referenzen (Marker, Targets) oder natürliche Merkmale (Ecken, Kanten, ebene Formen) erkennen [Wag-05]. Es können Infrarot- (IR) oder Videokameras mit aktiven oder passiven Markern nach dem outside-in oder dem inside-out Prinzip verwendet werden. Aktive Targets senden selbst Signale aus (z. B. IR-LEDs), während passive Targets nur anhand ihres Aussehens von den Kameras erkannt werden (siehe Abbildung 3-12). Aktive werden auch im Dunkeln erkannt, aber aufgrund der eigenen Stromversorgung ist die Umsetzung aufwändiger. Die Dimensionen und Orientierungen der Marker sind bekannt. Die aus verschiedenen Perspektiven aufgenommenen Bilder bilden die Basis für die räumliche Positionsbestimmung durch Triangulation. Beispiele für ein inside-out IR-System ist der Forschungsprototyp HiBall der University of North Carolina [Wel-01]. Kommerzielle outside-in IR-Systeme sind das ARTtrack/DTrack der Fa. A.R.T [ART-08] oder die ARLiveCam der Fa. metaio [met-08]. Das bekannteste Framework für videobasiertes Markertracking ist das ARToolkit des Human Interface Technology Laboratory (HITL) der University of Washington [ATK-08].

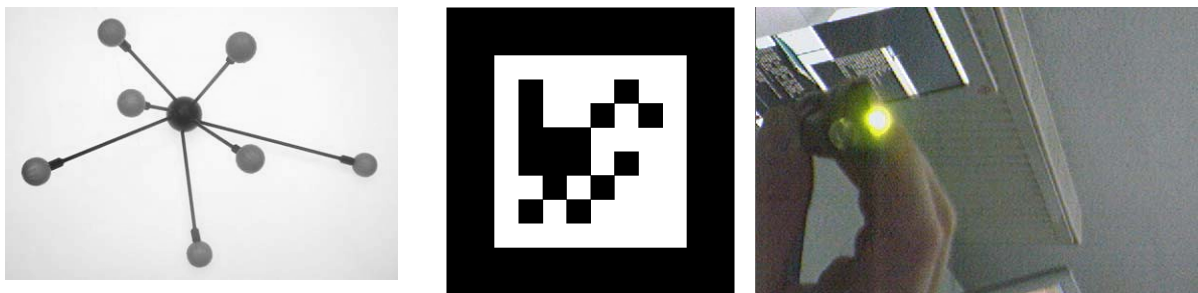


Abbildung 3-12: Passive Targets für IR-Systeme (links) und Videosysteme (Mitte) oder aktives Target mit LED (rechts)

Beim markerlosen Tracking nimmt eine Kamera Bilder der Umgebung auf, die vom Computer mit gespeicherten Referenzbildern (CAD-Kanten- oder Flächenmodelle) abgeglichen werden [Küc-03]. Für industrielle Anwendungen funktioniert das Tracking über Flächen wegen wenig strukturierter und reflektierender Oberflächen nicht.

Linien und Kanten sind dagegen nicht so anfällig [Wue-07] und so kann markerloses Tracking z. B. zur Montageunterstützung über Objekterkennung eingesetzt werden [Mol-04]. Neben klar strukturierten, kontrast- und kantenreichen Umgebungen braucht das markerlose Tracking eine Initialisierung. Der hohe Kontrast und das klar definierte Muster auch bei wechselnden Beleuchtungsverhältnissen ist ein Vorteil von markerbasiertem gegenüber markerlosem Tracking [Sut-06], wobei die meisten verwendeten optischen Systeme störanfällig bei sich veränderten Lichtverhältnissen sind. Die Bilderkennung benötigt sehr viel Rechenleistung. Beim Einsatz einer Videokamera reichen 20 Hz für ein ruckelfreies Bild und es werden Updateraten von 30 Hz ([Tho-00] [Küc-03]) bzw. bei IR-Systemen sogar 60 Hz erreicht [ART-08]. Die Genauigkeit und die Robustheit bei optischen Systemen sind sehr hoch, können aber verbessert werden, wenn mehrere Marker, deren Position zum Weltkoordinatensystem bekannt ist, gleichzeitig erkannt werden [BaG-04].

3.2.2.4 Hybride Verfahren

Unter hybridem Tracking wird die Kombination von verschiedenen Trackingtechnologien (Sensorfusion) verstanden. Alle vorgestellten Trackingverfahren haben ihre Vor- und Nachteile. Um die Schwachstellen der einzelnen Verfahren zu kompensieren, wird eine Erhöhung der Komplexität in Kauf genommen, wenn dadurch andere Parameter (höhere Genauigkeit oder Updaterate) entscheidend verbessert werden [Bow-05]. Zwei Sensoren mit sich gegenseitig ergänzenden Eigenschaften sollen die räumliche Beziehung zum selben Objekt relativ zu einem gemeinsamen Welt-COS berechnen, um Fehler zu reduzieren. Die Zusammenarbeit der Sensoren kann auf verschiedenen Wegen erfolgen [Wag-05]:

- komplementär (abgestimmt): Die Sensoren hängen nicht voneinander ab.
- konkurrierend: Mehrere Sensoren liefern die gleiche räumliche Information (Redundanz, Messfehlerreduktion).
- kooperativ (zusammenarbeitend): enge Verzahnung von Sensoren (z. B. wenn relative Position von A zu B und B zu C bekannt sind, dann ist auch A zu C bekannt)

Die Schwierigkeit besteht darin, die verschiedenen Informationen der unterschiedlichen Sensoren zu bewerten, zu gewichten und zu einer Pose zu vereinen (z. B. mit

Hilfe eines Kalman-Filters). Ubiquitous Tracking (Ubitrack) ist ein Framework, das die dynamische Fusion vieler (vorher unbekannter) Sensoren ermöglicht [Pus-08]. Die Kombination von mobilen und stationären Trackern erlaubt die Entwicklung eines neuen wide-area-Trackings. Beispielsweise werden eine Videokamera am Handheld-Gerät für optisches Markertracking, ein inertialer Sensor, ein wide-area Funksystem und ein optisches IR-System mit drei Kameras kombiniert. Je nach Verfügbarkeit der Daten der einzelnen Systeme wird die Pose des Handheld-Geräts berechnet.

Ein häufiges Beispiel für den Einsatz mehrerer Sensoren basiert darauf, dass optisches Tracking (sowohl IR als auch videobasiert) Probleme bei schnellen Kopfbewegungen hat. Durch den Einsatz eines zusätzlichen Inertialsensors können diese schnellen Kopfbewegungen ausgeglichen werden (z. B. in [Miy-08]). Ein zusätzlicher Effekt ist, dass, wenn ein Marker nicht mehr erkannt wird, dies der Inertialsensor überbrückt und die Pose liefert. Auf der anderen Seite kann der Inertialsensor stets initialisiert werden, wenn ein Marker erkannt wird, der Drift spielt keine Rolle mehr.

Es existieren darüber hinaus weitere zahlreiche Formen von hybriden Systemen, die sich beliebig zusammenstellen lassen (z. B. mechanisch und optisch in [Mer-08], RFID, Gyroskop und IR in [Bec-08], DGPS, Kompass, optisches Markertracking [Tho-00]).

3.2.3 Szenengenerator und Datenhaltungssystem

Der Szenengenerator übernimmt die räumlich und zeitlich korrekte Einbettung der virtuellen Objekte in das reale Bild [ScL-05], damit es der Anwender in der richtigen Perspektive wahrnimmt, und stellt somit auch die grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) zur Verfügung. Er bekommt die Pose vom Tracking-system, das Datenhaltungssystem sucht zu der jeweiligen Pose passende Informationen und gibt diese an den Szenengenerator weiter [Alt-03]. Der Prozess, der auf Basis eines Geometrie- und Beleuchtungsmodells und der Trackinginformationen ein lagegerechtes 2D-Pixelbild der virtuellen Objekte erstellt (Blickrichtung, Schatten etc.), wird als Bildsynthese oder Rendering bezeichnet [Pat-04]. Bei VST ist eine exakte Kamerakalibrierung nötig. Dies ist der Prozess, die intrinsischen und die extrinsischen Kameraparameter zu berechnen, die dazu benutzt werden, um die Beziehung zwischen dem, was auf der Bildebene erscheint, und wo es in der realen 3D-

Welt platziert ist, herzustellen [Zho-03]. Damit die virtuellen Objekte auch richtig in die Realität eingeblendet werden, sind einige Dinge zu beachten [Kli-01]:

- die Verdeckung der virtuellen Informationen durch reale Objekte (Occlusion),
- die Tiefenwahrnehmung oder
- Schatten und Reflektionen.

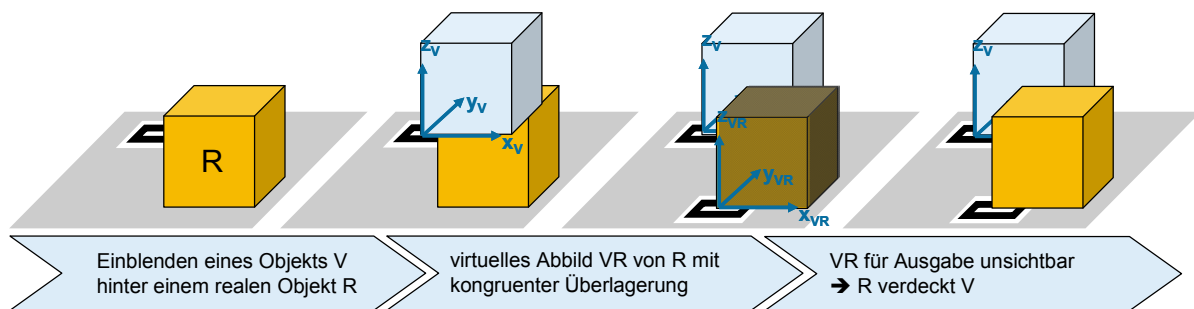


Abbildung 3-13: Erzeugung einer Verdeckung eines virtuellen Objekts durch ein reales

Diese Effekte sind notwendig, damit der Benutzer die virtuellen Informationen wirklich als Bestandteil der realen Welt aufnimmt. Wenn sich ein reales Objekt zwischen Auge und virtuellem Objekt befindet, wird das virtuelle Objekt vor realem angezeigt. Für eine Verdeckung wird dem realen Objekt ein unsichtbares virtuelles Abbild kongruent überlagert und es scheint so, dass das entsprechende reale Objekt das virtuelle verdeckt (siehe Abbildung 3-13). Auch der Schatten und Reflektionen von virtuellen Objekten wirken sich auf die realen Objekte aus. Für diese Effekte ist es oft notwendig, Teile der realen Umgebung ebenfalls virtuell abzubilden (reality model) und sie unsichtbar in die Szene einzubetten (z. B. für Verdeckung).

Es gibt drei Arten der grafischen Unterstützung für AR-Anwendungen [Fri-04]. Die Benutzer können mit Text, einfachen und komplexen Geometrien unterstützt werden. Die Textdarstellung ist mit einem sehr geringen Erstellungsaufwand und geringer benötigter Rechenleistung verbunden. Sie dient nicht der Verdeutlichung komplexer Sachverhalte. Der Text lässt sich um einfache 2D-Geometrien (Kreise, Pfeile etc.) ergänzen, die (meist) ohne Tracking in die Umgebung eingepasst werden (z. B. [Rob-04], [Sas-08]). Die Ladezeiten und der Erstellungsaufwand bleiben gering, allerdings ist die Darstellung vom Blickwinkel abhängig und für komplexe Sachverhalte wenig geeignet. Wird die Szene um dreidimensionale, lagerichtige eingeblendete

Objekte (meist VRML-Geometrien³¹) erweitert, erfolgt eine schnelle intuitive Informationsaufnahme für komplexe Sachverhalte. Allerdings steigen hierbei die Ladezeiten und der Erstellungsaufwand.

Je mehr Objekte oder je realitätsnaher die virtuellen Objekte (Oberfläche, Gravitation, keine Durchdringung von (realen) Gegenständen, Kollisionserkennung, Schatten etc.) modelliert werden, desto höher sind die Anforderungen an das Datenhaltungssystem und den Szenengenerator. Die Szene muss in Echtzeit ablaufen, so dass die Modelle an die verwendete Hardware angepasst werden müssen und somit nicht zu speicherintensiv sein dürfen [Kli-01]. In den meisten AR-Anwendungen ist eine geringe Latenzzeit wichtiger als eine realitätsnahe Visualisierung.

3.2.4 Interaktionssystem

Das Interaktionssystem wird oft als wichtige Komponenten eines AR-Systems vergessen. Der Benutzer muss aber in Echtzeit mit den virtuellen Daten interagieren können und somit ist das Interaktionssystem neben dem Visualisierungsmedium die zweite wichtige Mensch-Maschine-Schnittstelle. Bei der Gestaltung der Interaktion spielen der Szenengenerator, das Visualisierungsmedium und das Interaktionsgerät zusammen.

3.2.4.1 Anforderungen aus Sicht der Augmented Reality

Die Interaktion wird bei vielen Anwendungen gar nicht angesprochen, weil sie meist über Eingaben am Rechner (Tastatur, Maus), der sowieso am Mann getragen werden muss, oder nicht durch den unmittelbaren AR-Benutzer selbst, sondern durch den AR-Entwickler, der das System von einem separaten Rechner aus steuert (Wizard-of-Oz-Ansatz), erfolgt. Die bekannten Desktop-Metaphern funktionieren aber bei mobilen AR-Anwendungen nicht mehr, weil die Benutzeroberfläche (User Interface, UI) in die reale Welt transformiert wird. Das gebräuchliche WIMP-UI³² mit bekannten PC-Eingabegeräten ist für den mobilen Einsatz benutzerunfreundlich bzw. untaug-

³¹ VRML: Die Virtual Reality Modeling Language ist eine weit verbreitete Beschreibungssprache für 3D-Szenen, die ursprünglich für das Internet entwickelt wurde, aber auch in VR-Umgebungen weit verbreitet ist.

³² WIMP: Windows Icons Menu Pointer

lich. Durch AR ist eine uneingeschränkte Aufmerksamkeit auf die Interaktion nicht mehr gegeben. Die Interaktion muss mit bis zu sechs Freiheitsgraden bei hoher Mobilität und ggf. ohne Einsatz der Hände (hands-free) ablaufen [Oeh-04], weil sich der Mensch im Raum bewegt und nicht vor dem Computer. Bei AR werden zwei Interaktionstechniken gebraucht, um zum einen mit den realen und zum anderen mit den virtuellen Objekten zu interagieren. Dabei kann eine Lücke in der Interaktion entstehen, wenn kein haptisches Feedback bei der Interaktion mit den virtuellen Objekten erfolgt [Bow-05]. Wenn für die Interaktion mit den virtuellen Objekten extra ein Eingabegerät benutzt werden muss, das nicht in der realen Welt existiert, wird der natürliche Workflow unterbrochen [Pou-01]. Für AR sind neue Interaktionsschemata notwendig mit dem Ziel, den Computer unsichtbar zu machen, um die Benutzerleistung zu steigern. Die Interaktion ist bei AR nicht auf einen menschlichen Informationskanal beschränkt, sondern kann auf zwei oder mehr Sinne ausgedehnt werden (multimodale Interaktion) [ScL-05].

3.2.4.2 Eingabegeräte und Interaktionsmetaphern

Technologien können aus technozentrierter und benutzerzentrierter Sicht gestaltet werden [ScL-05]. Bei AR steht meist noch die Entwicklung der Hardware oder eine Optimierung der Visualisierung im Vordergrund, die Interaktion wird außer Acht gelassen [Ish-97]. Da es noch keine speziellen AR-Eingabegeräte auf dem Markt gibt [Bar-04], werden für die Interaktion herkömmliche Desktop-Geräte oder Geräte aus der VR (Sticks, Datenhandschuhe etc.) verwendet. Es findet sich nur sehr wenig Literatur ([Beu-04], [Bow-05], [Jan-04], [ScL-05]), die sich mit dem Design von 3D-Benutzerschnittstellen für AR beschäftigt. AR zeigt neue Möglichkeiten, aber auch neue Herausforderungen und nötige Entwicklungsarbeit auf [Bow-05]. Bei derzeitigen AR-Systemen ist meist nur eine beschränkte Zahl an Interaktionen möglich. Oft wären aber komplexere Interaktionen gewünscht, für die es weder geeignete Geräte noch Metaphern gibt. Es kann eine Vielzahl v. a. von haptischen und akustischen Geräten (Spracheingabe) eingesetzt werden ([Pat-04], [Rüg-02]). Das Interaktionsgerät ist abhängig von der Aufgabe, der Verfügbarkeit des Geräts und wie die Benutzer daran gewöhnt sind [Bar-04]. Wenn es für den Anwendungsfall ausreicht, kann auch ein kleiner Joystick am UMPC, der sowieso in der Hand gehalten werden muss und auf die Anwendung zugeschnitten ist, als optimales Eingabegerät dienen [ScG-08].

Die Sprache bietet die Möglichkeit mit dem AR-System zu interagieren, ohne die eigentliche Tätigkeit zu unterbrechen [Bre-04]. Wie bei PbV-Systemen können Umgebungsgeräusche in industriellen Umgebungen Spracheingaben beeinflussen. Die Nachteile der Sprachausgabe bei PbV gelten in diesem Fall nicht, dafür alle Vorteile der Spracheingabe (siehe Kapitel 2.6.2.4). Der visuelle Sinn wird vom Menschen für die Informationsaufnahme bevorzugt, während er über Sprache am liebsten Informationen weitergibt. Daraus könnte man folgern, dass dies die optimale Kombination für ein Arbeitsmittel ist. Allerdings ist die Sprache auch nicht immer die beste Lösung, z. B. für die Eingabe von Symbolen (Text etc.) [Bow-05].

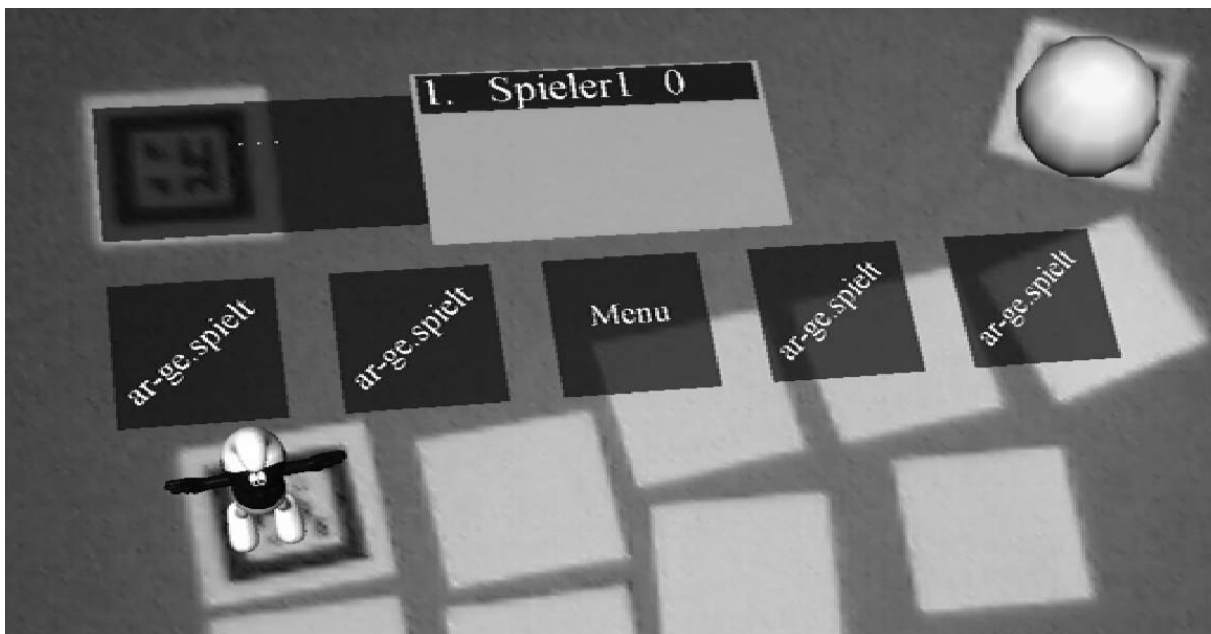


Abbildung 3-14: Tangible Interface: das virtuelle Menü wird über einen speziellen Papiermarker bedient (rechts oben, gekennzeichnet durch eine virtuelle Kugel)

Nicht alle Änderungen in der realen Welt können mit physikalischen Trackinggeräten (Datenhandschuhe, Bodysuits, getrackte Laserpointer etc.) erfasst werden. Ebenso kann der Benutzer nicht alle Eingaben verbal beschreiben. AR-Systeme bieten die Möglichkeit, Änderungen in der realen Welt automatisch zu erkennen. Die direkte Interaktion mit realen Objekten, z. B. mit Papiermarkern auf einem Tisch (Tangible Interface, siehe Abbildung 3-14) ist eine neue Form der Interaktion mit AR (z. B. tangible bits [Ish-97]). Die Kopplung virtueller an reale Objekte überbrückt die Lücke, dass virtuelle Objekte nicht gegriffen werden können. Durch die einfache zweihändige Interaktion mit realen und virtuellen Objekten, ohne dass ein kompliziertes Trackingsystem notwendig ist, erfolgt ein nahtloser Übergang zwischen real und virtuell

[Bow-05]. Tangible Interfaces liegen weit links im RV-Continuum [Bil-01]. Das Mixed Reality Authoring Interface Tiles verfügt über ein derartiges UI [Pou-01]. Dabei können Marker an einer Magnettafel von mehreren Benutzern (kollaborative Interaktion) verschoben werden. Die Marker sind universelle Datencontainer, denen beliebige virtuelle Objekte (Daten, Menüs) zugewiesen werden können, so dass keine Abhängigkeit der Markerform von der Form des zugeordneten virtuellen Objekts besteht. Das Interface ist nicht vorgegeben, sondern wird vom Benutzer bestimmt. Die Interaktionen zwischen den Markern erfolgt, indem sie zueinander gebracht werden (Überdeckung von mindestens 15 % der Größe) und dies für mindestens eine Sekunde gehalten wird, um zufällige Interaktionen zu vermeiden. Hände können die Marker verdecken, so dass sie nicht mehr erkannt werden. Deshalb werden die Marker z. B. auf ein Paddel (ähnlich einem Tischtennisschläger) geklebt und der Benutzer verschiebt die Marker, indem er den Griff des Paddels in die Hand nimmt. Dadurch, dass das Paddel getrackt wird, kann auch die Verdeckung berechnet werden [Kat-00].

3.3 Einsatzbereiche im industriellen Umfeld

Erste Anwendungen der AR-Technologie gab es bereits Ende der 1960er Jahre in Form von Prototypen beim Militär. AR wird zur Unterstützung bei der Bedienung von Geräten, in Kampffjets oder Hubschraubern und zur Informationsbereitstellung für Bodentruppen ([Tap-01], [BaF-07]), aber auch für zivile Einsatzbereiche wie z. B. die Instandhaltung oder die Medizin verwendet [Tap-01]. In der Medizin sind vielfach Aufnahmen (Röntgen, Magnetresonanzbilder Computertomographie etc.) vorhanden, die es erlauben, operative Eingriffe mit AR durch die Projektion dieser Daten direkt auf den Patienten zu unterstützen ([Nav-99] [Rol-01b]). Der Nachteil der räumlichen Trennung zwischen Handlung und Beobachtung (Blick auf externe Monitore) wird aufgehoben und die natürliche Hand-Augen-Koordination ist wieder verfügbar [Sut-06]. Für den medizinischen Einsatz muss ein derartiges System hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Sicherheit erfüllen und zu 100 % funktionieren.

Die Unterhaltungsindustrie mit ihrem Massenmarkt ist ein weiterer sehr interessanter Anwendungsbereich für AR. Spiele werden vom Rechner in die Realität übertragen wie z. B. Firstperson Egoshooter [Tho-00]. Mit Eye of Judgement brachte Sony 2007

das erste kommerzielle AR-Spiel für die Playstation 3 auf den Markt, das am Tisch mit einem Tangible Interface gespielt wird [Eye-08]. Bei AR-Büchern wie z. B. dem Magic Book werden herkömmliche Bücher um virtuelle Informationen (Bilder, Animationen) erweitert und über einen Handheld ([Bil-01], [Gra-08]) oder Monitor ausgegeben [met-08]. Stadt- oder Museumsführer sind weitere Anwendungsgebiete, in dem Führungen z. B. durch AR-Animationen bereichert werden [Miy-08].

AR wird in der Architektur und im Bauwesen zur Kundenpräsentation von zukünftigen Objekten [Kli-01], zum Anzeigen von virtuellen Bauständen in der Realität [Beh-05], zur Einrichtungsplanung [met-08], bei Renovierungen zum Abgleich mit bestehenden Strukturen, zum schnellen Anzeigen von Designänderungen in der Konstruktion sowie von versteckten (Kabel, Rohre etc. in der Wand) oder mit den Augen nicht erfassbarer Informationen (z. B. Hitze oder Druck in Rohren) in der Instandhaltung [Web-96] oder im Straßenbau verwendet [ScG-08]. Denkbar ist auch der Einsatz im Tagebau zur Unterstützung des Schaufelradbaggerfahrers, indem ihm wichtige Daten über ein HMD oder HUD direkt ins Gesichtsfeld eingeblendet werden [Gün-06b].

Im innerbetrieblichen Umfeld lässt sich AR für geistige Tätigkeiten wie die Produktentwicklung oder die Produktionsplanung ebenso verwenden wie für operative Aufgaben in der Produktion, Qualitätssicherung und Instandhaltung.

3.3.1 Produktentwicklung

In der Produktentwicklung geht der Trend vom physischen zum digitalen Mock-up, um eine schnellere Variantenbildung und Evaluierung zu ermöglichen. Die dabei oft eingesetzte VR lässt sich bei Änderungen an realen Produkten nicht verwenden. Mit AR können auch Kollisionen von realen mit virtuellen Objekten erkannt werden, v. a. wenn nicht alle Komponenten digital verfügbar sind [BaG-04]. Änderungen und neue Konzepte in der virtuellen Entwicklungsumgebung werden direkt im realen Umfeld visualisiert, überprüft und in einer ersten Validierung bewertet. AR ist ein fester Bestandteil der Entwicklung neuer Fahrzeuggenerationen [Mer-08]. Die Szene, z. B. der reale Motorraum, wird von einer Kamera festgehalten und mit virtuellen Daten, z. B. elektrischer Leitungen, überlagert. So kann auch die Hochzeit, d. h. die Vereinigung von realer Karosserie und virtuellem Antriebsstrang in der Fahrzeugproduktion vorweggenommen werden [Fuc-08]. Auf realen Fahrzeugen lassen sich verschiedenste virtuelle Felgen aufziehen [met-08]. Im Flugzeugbau können unsichtbaren Simulati-

onsdaten (z. B. Strömungen) in einer realen Flugzeugkabine visualisiert werden [BaG-04].

AR kann auch als Hilfe für Produktentwickler eingesetzt werden. Beim MagicDesk ist ein Papiermarker auf einer Platte angebracht [BaG-04]. Mit diesem neuen Interface werden 3D und 2D kombiniert. Auf dem Brett kann das normale 2D-Bild des Monitors (z. B. Oberfläche eines CAD Programms) angezeigt oder das auf dem Brett stehende 3D-CAD-Modell aus allen Blickwinkeln betrachtet werden. Diese Konfiguration findet auch für das MagicMeeting Verwendung, um gemeinsam zu konstruieren und zu diskutieren. Alle beteiligten Personen tragen HMDs und sehen das Diskussionsobjekt aus ihrem Blickwinkel. Mit der Interaktionstechnik Tiles erfolgt eine einfache und effektive räumliche Anordnung von digitalen Objekten (z. B. Elementen einer Flugzeuginstrumententafel) durch virtuelles Positionieren von Papiermarkern. Gemeinsam können die verschiedenen an der Entwicklung beteiligten Disziplinen die Anordnungen diskutieren, verändern und evaluieren [Pou-01].

3.3.2 Produktionsplanung

Ziel des AR-Einsatzes in der Produktionsplanung ist einerseits die Validierung virtueller Planungsergebnisse anhand von realen Fertigungsumgebungen und andererseits die Unterstützung der kollaborativen Planung. AR soll dabei durchgängig vom Beginn bis zum Ende der Planung eingesetzt werden und mit anderen virtuellen Hilfsmitteln gekoppelt sein (CAD, Simulation) [Rei-03].

Mobile Produktionsplanung

Der Planer kann sich mit einem mobilen System direkt in der realen Fertigungsumgebung bewegen [Pat-04]. VRML-Modelle der geplanten Anlagen, die vorher vorbereitet wurden, werden lagerichtig in die Realität eingebunden. Durch Interaktion mit den virtuellen Objekten, z. B. über direkte Manipulation mit den Markern, wird eine interaktive Planung vor Ort möglich. Es können nicht nur die virtuellen Komponenten verschoben werden, sondern es lassen sich auch die Abstände zwischen den Objekten messen. Das System kann durchgehend von der Planung des Layouts über die Auslegung einzelner Arbeitsplätze (z. B. Greifraum) bis hin zur Einarbeitung und Montageunterstützung eingesetzt werden. Bei einem theoretischen Montageprozess zeigte ein Vergleich mittels einer MTM-Analyse eine Zeitersparnis von 40 % zum

herkömmlichen Prozess mit einem Monitor als Informationsbereitstellungsmedium, weil das Scannen und der Blick zum Monitor entfielen.

Fotobasierte Produktionsplanung

Das Ziel der fotobasierten Produktionsplanung ist die Absicherung der Datenqualität im Vorfeld von Umbauarbeiten oder Erweiterungs- bzw. Änderungsplanungen. Somit lassen sich frühzeitig im Planungsprozess geometrische Engstellen oder Kollisionen zwischen der realen Umgebung und den neuen, noch virtuellen Elementen erkennen (Störkantenanalyse). Dabei kann z. B. untersucht werden, ob es möglich ist, ein neues Fahrzeug bzw. neue Fahrzeugkomponenten mit der bestehenden Fördertechnik zu transportieren [Gün-06a] oder ob bei der Auslegung einer Strecke für ein fahrerloses Transportsystem (FTS) die Mindestabstände ausreichen [Gün-04]. Sind keine aktuellen CAD-Daten der realen Fertigungsumgebung vorhanden, müssen diese aktualisiert werden (z. B. mit Hilfe von aufwendigem Laserscannen). Bei der AR-Lösung ist dies nicht nötig, denn es wird der aktuelle Stand der Fertigungsumgebung mit einbezogen. Dadurch erhöht sich die Planungssicherheit und es lassen sich zeit- und kostenintensive Hardwareaufbauten bzw. Nachkonstruktionen von Werksgeometrien vermeiden. Aufgrund des immer aktuellen Soll-/Ist-Vergleichs werden Fehlplanungen vermieden. Ein Pilotprojekt zum Soll-/Ist-Vergleich von Betriebsmitteln bei Volkswagen zeigt im Rahmen der Erweiterung einer Schweißstation, dass sich die Konstruktionssicherheit von 80 auf 98 % erhöhen lässt, während die Konstruktionskosten um 8 % reduziert werden konnten [Bad-08]. Weitere Einsatzgebiete sind Einbau- und Montagesimulationen oder Ergonomieuntersuchungen [ScD-05].

Partizipative Planungsmethoden

Bei der partizipativen Planung ist das Ziel, dass alle am Planungsprozess beteiligten Personen gemeinsam planen, um die Kommunikation zu fördern und Synergien zu nutzen. Dies erfolgt häufig in interdisziplinären Planungsworkshops. Dabei wird mit Platzhaltern (z. B. Kartons) ein 1:1 Modell des betrachteten Fertigungsbereichs aufgebaut. Bei der AR-Lösung kleben auf den Kartons Marker. Die Szene wird gefilmt und über eine Projektionsleinwand um die virtuellen Objekte angereichert ausgegeben. Die Objektgrößen und somit Flächen können besser abgeschätzt werden, weil das Objekt nicht mehr durch den Karton, sondern durch das maßstabgetreue vir-

tuellen Modell repräsentiert wird. Die erstellten Layoutvarianten lassen sich dann in ein CAD-Tool exportieren [Bad-08].

Eine verkleinerte Variante davon ist der Planungstisch. Anstatt mit miniaturisierten Modellen von realen Anlagenkomponenten die Planung auf dem Tisch vorzunehmen, wird das virtuelle 2D-Layout direkt darauf projiziert und Markern die virtuellen Anlagenkomponenten zugewiesen ([Fje-99], [WeE-04]). Eine Kamera nimmt die Szene und somit die Position der Marker von oben auf. Alle Personen können mit den Markern interagieren, das Layout verändern und somit gemeinsam Planen. Zusätzlich zum 2D-Layout auf dem Tisch wird das 3D-Layout über eine Leinwand ausgegeben. Die Anwendung kann auch in der Architektur und Städtebau sowie dem Einsatz von Datenbrillen inklusive Kamera für jeden Teilnehmer für eine bessere räumliche Wahrnehmung eingesetzt werden ([Kat-00], [BrW-04]). Die teure und zeitaufwendige Erstellung eines maßstabsgetreuen Modells entfällt und Änderungen können sofort gemeinsam vor Ort erfolgen. Planungstische sollten auch eine Planungslogik und die Anbindung an andere Planungssysteme beinhalten [Frü-04].

3.3.3 Produktion und Montage

Die Montage in Einzel- und Kleinserien ist mit hohen Kosten durch die manuellen Arbeitsschritte verbunden, weil es sich um komplexe und umfangreiche Montageoperationen handelt und diese bedarfsgerecht koordiniert werden müssen [Eve-01]. Eine Grundlagenuntersuchung im Labor lässt die Potenziale von AR erkennen [Tan-04]. Der Vergleich einer Papieranleitung, der Visualisierung der Anleitung auf einem Monitor bzw. über ein HMD sowie AR (HMD mit kongruenter Überlagerung) zeigt, dass AR zwar nur zu einem kleinen Zeitvorteil, aber zu signifikant weniger Fehlern führt. Durch den verringerten Suchaufwand aufgrund der Visualisierung der Bauteile direkt am Montageort verursachte AR die geringste mentale Arbeitsbelastung. Im Rahmen von ARVIKA erfolgte eine ausführliche Untersuchung der Montageunterstützung, indem dem Monteur über ein HMD Text, Grafiken, Animationen oder auch lagerichtig eingebettete 3D-Geometrien angezeigt werden ([Alt-03], [Eve-01], [Rei-02], [Wie-04]). Die kontextabhängige Einblendung von Daten verringert Sekundäroperationen wie das Lesen von Informationen. Wichtiger ist aber die Fehlervermeidung durch AR, so dass keine teuren Prüfmittel gebraucht werden bzw. weniger Nacharbeit erforderlich ist, was zu Einsparungen führt [Rei-02]. Ein weiterer Schritt zur Fehlervermei-

dung ist, dass das AR-System automatisch den lagerichtige Einbau überprüft, indem über die aus den CAD-Daten bekannten Lagen und Geometrien ein Soll/Ist Vergleich vorgenommen wird [Ber-07].

Kabelbaummontage

Die Kabelbaummontage bei Boeing war das erste zivile AR-Projekt im Bereich Produktion und Instandhaltung ([Cau-92], [Miz-01], [Nas-97]). In der Projektlaufzeit von Anfang bis Ende der 1990er Jahre wurden verschiedenste Prototypen aufgebaut. AR ist für den Flugzeugbau interessant, weil wegen der kundenindividuellen Jets der Montageprozess lang, kompliziert und folglich nur beschränkt automatisierbar ist. In einer Boeing 747 sind ca. 1.000 Kabelsätze von ca. 60 cm bis 40 m Länge zu verlegen. Die Kosten für den AR-Einsatz stellen nur einen geringen Prozentsatz bei Flugzeugkosten zwischen 100 und 200 Mio \$ dar. Bisher erfolgt die Kabelbaummontage vor dem Einbau in das Flugzeug auf großen Boards mit einem aufgeklebten, maßstabsgetreuen Ausdruck des Kabelbaums. Jedes Board ist einzigartig und erfordert hohe Konstruktions- und Lagerkosten. Herkömmlich erhält der Mitarbeiter Anweisungen auf Papier. Mit AR können überlagerte Montagediagramme, Skizzen oder Text angezeigt werden, ohne auf Papierdiagramme und Teilelisten zu schauen, was zu Produktivitätsverbesserungen von bis zu 50 % führen kann. Trotz der noch nicht optimalen Benutzerschnittstelle lernten die Mitarbeiter, schnell mit dem System umzugehen und es gab keine Probleme hinsichtlich der Sicherheit. Das System rief hohe Akzeptanz bis große Ablehnung (Nacken-, Kopfschmerzen, Frisur etc.) bei den Mitarbeitern hervor. Der Prototyp kostete pro Person 8.000 bis 16.000 \$. Die Kabelbaummontage stellt einen interessanten Anwendungsfall für AR dar, der auch in der Automobilindustrie verfolgt wird ([Bar-04], [Oeh-04], [ScL-05]).

Bolzenschweißen

AR wird zur Unterstützung des manuellen Bolzenschweißens im Prototypenbau bei BMW verwendet ([BMW-05], [Ech-04]). Pro Karosserie müssen ca. 300 Bolzen mit hoher Präzision gesetzt werden. Herkömmlich wird ein Schweißpunkt in zwei Arbeitsschritten mit Hilfe eines Messarms markiert und anschließend gesetzt. Der Messarm ist nicht mit einem Computersystem verbunden, so dass ein Mitarbeiter die Koordinaten vorliest und ein anderer den Arm führt. Mit AR wird die Position des Bolzens über die Visualisierung einer Zielscheibe über das an der Schweißpistole angebrachte

Display angezeigt. Außerdem werden die x-, y-, z-Koordinaten der Pistolenspitze und des Punktes, sowie über einen Pfeil (Kompassmetapher) die Richtung zum Punkt eingeblendet. Bei Versuchen waren die Mitarbeiter viermal so schnell und ebenso genau, wie mit der herkömmlichen Methode, was zu einer Zufriedenheit der Mitarbeiter beitrug. Die Pistole war aber schwerer und unhandlicher (Integration von Display und Target). Bei einem weiterentwickelten Prototypen wurden aktive Marker in das Gehäuse integriert sowie eine „Gummiband-“Metapher (siehe Kapitel 6.5.1.3) für die Orientierung und ein farbliches Feedback implementiert. Diese produktive und serienreife Anwendung setzen bereits auch andere Automobilhersteller ein [ScD-05].

Roboterprogrammierung

Roboterbahnkurven lassen sich mit AR in 3D generieren und visualisieren [Zäh-04]. Vor allem bei KMU ist der Zeitaufwand für die Roboterprogrammierung im Verhältnis zur Produktionszeit hoch. Die Anschaffungskosten stellen nur noch einen geringen Anteil an den Gesamtkosten dar. Kosten treten v. a. für Programmänderungen während des Anlaufs und bei Variantenänderungen, Störungsbehebung und Wartung sowie Schulung des Betriebspersonals auf. Mit AR wird der Roboter virtuell (Überlagerung mit realem Roboter ist möglich) in das Sichtfeld eingeblendet und mit einem speziell getracktem Interaktionsgerät die Bahnkurve direkt in die reale Umgebung gezeichnet. Im Vergleich zur offline-Programmierung reduziert sich der Modellierungsaufwand, weil kein vollständiges, aktuelles Modell der Zelle vorhanden sein muss. Bei der online-Programmierung kann das Verhalten des Roboters in der Realität gefahrenlos betrachtet werden. Das Verfahren ist sehr schnell und intuitiv zu erlernen. Allerdings ist die Genauigkeit des Roboters (0,1 mm) höher als die des Trackingsystems (1 mm), so dass ggf. Nacharbeit nötig ist.

3.3.4 Qualitätssicherung

Durch die stark gestiegene Variantenvielfalt und den erweiterten Funktionsumfang von Produkten ist der zeitliche und monetäre Aufwand für die Qualitätssicherung (QS) überproportional gestiegen [ScB-07b]. Bei vielen Montageprozessen ist der fehleranfällige Mensch unverzichtbar. Zu spät erkannte Fehler führen zu zeitintensiver

Nacharbeit [Ber-07]. AR kann zur Unterstützung von CAQ³³-Systemen beitragen, indem innerhalb der Fließfertigung mit Hilfe eines mobilen Systems die Mängel kontextabhängig erfasst werden. Anstatt der Handhabung von Papierdokumenten werden die Daten online an das CAQ-System weitergereicht. Zusätzlich ist eine Fehlerbehebung ähnlich der Montageunterstützung möglich ([Alt-03], [Fri-04]). Aktives Fehlermanagement wird betrieben, wenn bei der Qualitätskontrolle beispielsweise in der Karosseriefertigung die Schweißpunkte in Echtzeit mit einem Laser auf das Bauteil projiziert werden und ein Abgleich (Vorhandensein, Position) mit den realen Schweißpunkten erfolgt [ScB-07b]. Es können Symbole (für verschiedene Prüfmethoden) auf das Bauteil projiziert werden, aber z. B. keine Texte wie komplette Prüfanweisungen. Der Werker liest die ausführlichen Prüfanweisungen ggf. von einem Monitor ab, so dass eine Trennung von „where-to-act“ und „what-to-do“ entsteht.

3.3.5 Instandhaltung und Service

Viele Anlagenbauer liefern ihre Produkte global aus. Da sie nicht überall Servicetechniker vor Ort haben, gewinnt die Fernwartung an Bedeutung. Reisekosten und Kapazitäten des Wartungspersonals lassen sich einsparen. Anstatt den Experten herbeizurufen, trägt ein Werker vor Ort eine Kamera, dessen Videobild der Servicetechniker des Anlagenbauers in der Ferne sieht. Über ein Sprachsystem kommunizieren beide [Lan-08]. Neben der Kommunikation können dem Werker vor Ort auch Text, Zeichnungen oder Videos angezeigt werden, wenn dieser zusätzlich ein Look-Around-HMD trägt [Hei-08]. Wird die Kamera für optisches Tracking mit Markern an der Anlage oder Kantenerkennung genutzt, können dem Mitarbeiter auch 3D-Daten lagerichtig im Raum angezeigt werden ([Rie-06], [Wue-07]).

Beim Service geschehen oft unvorhersehbare Ereignisse bzw. ist keine feste Vorgehensweise möglich. Es müssen ungewöhnliche und seltene Aufgaben ausgeführt bzw. auch teilweise ungeschulte Mitarbeiter unterstützt werden [BaG-04]. Durch eine situationsbezogene Darstellung ist es Werkern möglich, auch an unbekanntem Instandhaltungsobjekten Servicearbeiten durchzuführen. Der Vorteil von AR ist, dass der Aufmerksamkeitsfokus des Personals während der Informationserfassung auf dem Instandhaltungsobjekt verharrt anstatt wie bei herkömmlichen Techniken stän-

³³ CAQ: Computer Aided Quality Assurance

dig zwischen Anleitung und Instandhaltungsobjekt wechselt [Sas-08]. AR kann zum Wechseln eines Papierfachs eines Druckers [Fei-93] ebenso eingesetzt werden wie zur Wartung von Motoren, U-Bahnen [BaG-04], Flugzeugen [Bec-08] oder ganzer Anlagen [Wec-04].

3.3.6 Schulung

Die Anforderungen an die operativen Mitarbeiter werden durch eine Vergrößerung von Aufgabenumfängen größer. Sie müssen schnell auf Änderungen in den Tätigkeitsfeldern reagieren. Deshalb ist es wichtig, den Werker dann zu unterstützen, wenn er es am meisten braucht, nämlich bei der Arbeit in der realen Welt. Bisher begleiten qualifizierte und motivierte Mitarbeiter aus den unterstützenden Arbeitsprozessen die Einführung neuer Techniken und stehen Kollegen zur Verfügung (Promotorenkonzept) [Fri-04]. Diese Trainer sind aber oft nicht verfügbar, schwierige Sachverhalte mit Sprache nur schwer erklärbar und der Aufbau von realen Trainingsszenarien ist zu teuer [Zho-03]. AR bietet die Möglichkeit, den Lernenden durch konkrete Handlungsanweisungen durch den neuen Prozess zu führen. Fehlhandlungen, insbesondere beim Einsatz ungelerner oder unerfahrener Werker, lassen sich durch diese Führung vermeiden. Bereits nach einer kurzen Einweisung beginnt das Training on the job. Es ist keine Prozessschulung notwendig. AR kann die Einarbeitungsphase neuer Mitarbeiter als auch einen ganztägigen Einsatz unterstützen, um Anlauf- wie auch Standardprozesse zu beschleunigen [WaD-07a]. Der Lernende kann zudem von einem Trainer aus der Ferne unterstützt werden. Da er eine Kamera bei sich trägt, sehen der Trainer und evtl. andere Lernende das Kamerabild an einem Desktoparbeitsplatz und können ihm durch Sprachinformationen oder sogar über Remotesteuerung helfen bzw. anweisen [Zho-03].

3.3.7 Kommissionierung

Die ersten Laborversuche zur AR-unterstützten Kommissionierung unter Einsatz eines HMD wurden im ARVIKA-Projekt durchgeführt [Alt-03]. Mit AR wurde das Bild und die Identifikationsnummer angezeigt bzw. mit Einsatz des Trackingsystems die Aufnahme- bzw. Ablageposition von Aufklebern durch einen roten Rahmen mittels kongruenter Überlagerung hervorgehoben.

Praxisuntersuchung ohne Trackingsystem

In einem vierwöchigen Pilotprojekt in der LKW-Montage wurde im Kommissionierlager anstatt einer Papierliste ein AR-System mit einem monokularen VRD eingesetzt [Bra-05]. Es wurde nur eine Pickliste angezeigt und die Quittierung erfolgte über einen großen Taster, weitere Interaktionen über vier Funktionstasten. Das Ziel war eine Minimierung der physischen und psychischen Mehrbelastung durch die Technologie und eine Optimierung der Arbeitsprozesse. Die Gestaltung der haptischen und visuellen Schnittstelle wurde als gelungen und zweckmäßig empfunden. Allerdings kann der Vollschichteinsatz wegen Belastungen durch die Geräte hinsichtlich des Gewichts, des Tragekomforts und der Wärmeentwicklung nicht bedenkenlos empfohlen werden. Einige Werker klagten über Kopfschmerzen, deren Ursachen nicht genau spezifiziert werden konnten. Dies konnte an der abwechselnden Fokussierung zwischen den virtuellen Informationen und der Realität ebenso liegen wie am Tragekomfort, so dass im Anschluss eine Laborstudie zur Klärung der Ursachen erfolgte ([FrL-06], [Kam-06]). AR wurde mit einer Papierliste verglichen, wobei bei der Liste zwei Durchgänge (einmal mit ausgeschaltetem HMD) zu absolvieren waren. Die Arbeit mit dem HMD hatte keinen Einfluss auf die psychische Belastung und Beanspruchung der Teilnehmer. Die Probanden hatten mehr Beschwerden bei ausgeschaltetem HMD. Dies lag an zusätzlichen Kopfbewegungen, weil die Informationen nicht im Blickfeld waren und daran, dass kein Sinn beim Tragen des HMD ersichtlich war.

Ähnliche Ergebnisse zeigte eine praxisnahe Untersuchung [ReR-08]. Über ein VRD erfolgte nur die Anzeige der aktuellen Position, die Navigation durch den Prozess übernahm eine Sprachsteuerung. Die Probanden begingen im Vergleich zu einer Papierliste deutlich weniger Fehler, waren aber nur etwas schneller, wobei sich eine steile Lernkurve erkennen ließ.

Einsatz von bi(n)okularen Datenbrillen

In einem Laborversuch am Heinz-Nixdorf-Institut (HNI) der Universität Paderborn wurde ein binokulares VST HMD eingesetzt, über das den Probanden permanent eine Kommissionierliste (Lagerort, Artikelnummer, Anzahl) sowie zur hervorgehobenen aktuellen Position Textinformationen und ein zugehöriges Artikelfoto angezeigt wurden ([Dan-05], [Mue-05]). Erscheint der nächste Lagerplatz im FoVD, ertönte ein Hinweiston und er wurde durch eine farbige Umrandung hervorgehoben. Eine Lager-

skizze mit dem letzten und nächsten Lagerort war jederzeit einblendbar. Die Quittierung und die Korrektur von Mengenfehlern erfolgten über eine Armtastatur. Beim Vergleichstest mit einer Papierliste wurden Mengenfehler (Mindermenge) und ein falscher Artikel eingebaut. Während alle Mengenfehler mit beiden Techniken erkannt wurden, entdeckten die Probanden den Typfehler mit AR jedes Mal und mit der Liste nur zu 50 %. Bei den Benutzern ließ sich eine steile Lernkurve erkennen, die bei der Benutzung von AR signifikant stärker ausgeprägt ist. Die Kommissionierzeit war mit dem AR-System um 20 % höher, was auf den einfachen Lageraufbau zurückgeführt wurde. Dieser Unterschied beruhte auch auf dem VST HMD mit dem viel zu kleinen FoVE, denn 73 % der Probanden hatten Orientierungsprobleme.

Bei der Untersuchung verschiedener Visualisierungen zur Unterstützung des operativen Logistikmitarbeiters im Forschungsverbund „Supra-adaptive Logistiksysteme (ForLog)“ wurde neben statischen Monitoren und einem PDA auch ein biokulares HMD getestet [ScB-07a]. Die Unterstützung der Probanden bei der Weg- und Lagerfachfindung erfolgte mit Textinformationen, einer 2D-Karte und 3D-Objekten. Bei der Weg- und Lagerfachfindung ließen sich keine signifikanten zeitlichen Unterschiede hinsichtlich des Displays erkennen. Bei allen drei Technologien wurde die Liste zur Wegfindung wegen der mit einem Blick ablesbaren Informationen bevorzugt. Die 2D-Karte musste ständig beobachtet werden. Die 3D-Visualisierung am HMD war signifikant langsamer, wobei im letzten Durchlauf ein Lerneffekt von 50 % auftrat. Die Fehlerrate war bei der 3D-Visualisierung zehnmal höher, weil oft in das Fach darüber und darunter gegriffen wurde. Dies lag an Problemen mit der Tiefenwahrnehmung mit dem monoskopischen HMD. In Abhängigkeit der 3D-Erfahrung kristallisierten sich eine schnelle und langsamere Benutzergruppe heraus.

Untersuchungen hinsichtlich des Langzeiteinsatzes

An einem der industriellen Kommissionierung ähnlichen Referenzarbeitsplatz erfolgten Untersuchungen hinsichtlich der Langzeitbeanspruchung mittels Messung der Herzratenvariabilität / Herzrhythmusanalyse [Tüm-08]. Mit einem monokularen VRD ließen sich Text (Regalnummer, Teilenummer, Position) und ein Rechteck um das aktuelle, durch einen Marker gekennzeichnete Lagerfach darstellen. War das aktuelle Lagerfach nicht im Bild, wurde über einen 2D-Pfeil die Richtung zum Zielmarker angezeigt. Die Probanden quittierten über eine Unterarmtastatur. Es wurden keine signifikanten Unterschiede des Herzfrequenzverlaufs zwischen der Vergleichstech-

nologie Papierliste und AR festgestellt. Nur am Anfang war die Beanspruchung bei einigen Probanden mit AR aufgrund der für sie neuen Technologie höher. Aber nach zwei Stunden, d. h. gegen Ende der Versuche, konnte kein Unterschied mehr festgestellt werden. Bei AR traten deutlich weniger Fehler als bei der Liste auf. Das AR-System war um 30 % langsamer, was auf die See-Through-Kalibrierung, die Latenz von 0,3 Sekunden zwischen realem und virtuellem Objekt, das Interaktionsschema und lose hängende Kabel zurückzuführen war. Die Probanden äußerten ein sehr positives Feedback, aber es traten bei einem suboptimal eingestellten Systemträger Kopfschmerzen auf.

3.4 Zusammenfassung der Einsatzbereiche

Die Forschung hat Potenziale für den industriellen Einsatz von AR erkannt, weshalb weiter vielfältige Arbeiten betrieben werden. Die meisten der aufgeführten Anwendungen befinden sich erst im Prototypenstadium. Anwendungen in der Praxis sind oft monitorbasiert und teilweise ohne Echtzeittracking (siehe Tabelle 3-3). Praktikable mobile Systeme sind mit einem Handheld ausgestattet. Die „Killer Application“ für das Wearable Computing ist noch nicht gefunden. Jede Person, die schon ein Wearable-Computing-system mit HMD und speziellem Eingabegerät benutzt hat, wird bestätigen, dass sich Standardapplikationen damit unmöglich auf Dauer bedienen lassen [Rüg-02]. Trotz Nachweis von Vorteilen sind mobile AR-Systeme mit HMD noch nicht im produktiven Einsatz. Dies liegt auch an der noch ungenügenden Bearbeitung der Fragestellungen hinsichtlich nutzerbezogener Aspekte sowie der unklaren Langzeitbeanspruchungen [Tüm-08]. Neben dem HMD sind weitere Kernprobleme die Genauigkeit und Robustheit des Trackingsystems, desktopbasierte Interaktionskonzepte, die Aufbereitung der Daten (Informationsmanagement), die geforderte Rechenleistung der mobilen Rechner oder die Vernachlässigung menschlicher Wahrnehmungsfaktoren (aufgrund technischer Defizite). Die Verdeckung wichtiger realer Informationen durch virtuelle Daten kann ein Problem darstellen, wurde aber in Labor- und Praxisuntersuchung nicht als störend empfunden, weil bei AR normal nur ein geringer Anteil an virtuellen Informationen vorhanden ist [Oeh-04]. Der Einsatz eines Trackingsystems erweist sich in industriellen Umgebungen oft als schwierig. Auch „ungetrackte Low-Tech-Nur-Text-Lösungen“ bieten hohes Potenzial zur Unterstützung von Montageprozessen [Fri-04]. Eine schlichte, aber effiziente Darstellung

von Textinformationen und Diagrammen kann ohne hohe Systemanforderungen generiert werden (z. B. in [Tap-01]) oder der Benutzer erzeugt die Überlagerung durch Kopfbewegungen und die guten menschlichen Eigenschaften zur Mustererkennung selbst [Sas-08].

Ein weiteres Entwicklungsfeld für den industriellen Einsatz ist die Prozessintegration von AR [ScM-07]. Der Programmieraufwand für eine AR-Szene ist durch eine fehlende Kopplung an bestehende Systeme hoch [Fri-04]. Für eine erfolgreiche Einführung von AR muss eine objektive Messung der Effektivität und Effizienz des neuen Systems verglichen mit dem herkömmlichen Prozess möglich sein. Dafür ist eine klare Anforderungsanalyse des Benutzers vor der finalen Integration und eine Nutzbarkeitsuntersuchung nach der Integration nötig [BaG-04]. Dabei sollte beachtet werden, dass das mentale Modell eines Werkers ein anderes ist als das eines AR-Entwicklers und -benutzers [Oeh-04].

	Visualisierung	Tracking	Interaktion	Status	Quelle
Architektur / Bau	OST HMD	Ultraschall, IR	Sprache	Labor	[Web-96]
	VST HMD, Monitor	Marker, GPS	-	Labor	[Kli-01]
	UMPC	GPS, inertial, Video	Joystick	Labor	[ScG-08]
	Monitor	Marker	PC	Praxis	[met-08]
	VST HMD	GPS, magn., inertial	Gesten	Labor	[Beh-05]
Instandhaltung	PDA, VST/OST HMD (mono)	Marker(los)	Sprache	L/P	[Fei-93], [Rie-06], [Wue-07], [Wec-04], [BaG-04], [Bre-04]
	VRD mono, LA, OST HMD	kein Tracking	Sprache	Praxis	[Sas-08], [Hei-08], [Tap-01]
	UMPC	RFID, inertial, WLAN, IR	-	L/P	[Bec-08]
Kommissionierung	VST HMD	Marker	Armtastatur	Labor	[Dan-05], [Mue-05]
	OST HMD	IR	Wizard of Oz	Labor	[ScB-07a]
	VRD mono	IR	Wizard of Oz	Labor	[ScB-08]
	VRD mono	Marker	Armtastatur	Labor	[Tüm-08]
	VRD mono	kein Tracking	Sprache	L/P	[ReR-08]
	LA mono	Marker, kein Tracking	Sprache, Maus	Labor	[Alt-03]
	mono VRD	ohne Tracking	Button, Tasten	L/P	[Bra-05], [Kam-06], [FrL-06]
	Projektor	RFID, optisch, inertial	Handheld Device	Labor	[Ras-04]
Produktion / Montage	OST HMD	magnetisch	Sprache	Labor	[Tan-04]
	mono VRD, LA	Marker	Sprache	L/P	[Ber-07], [Wie-04], [ScL-05]
	OST HMD	Marker	-	Labor	[Eve-01], [Rei-02]
	mono OST/VST, bino OST HMD	Ultraschall, inertial, Marker	Maus, Sprache	L/P	[Cau-92], [Nas-97], [Miz-01]
	Handheld	IR	Schweißpistole	L/P	[BMW-05], [Ech-04]
	OST HMD	IR, inertial	Zeigegerät getrackt	Labor	[Zäh-04]
Produkt- entwicklung	Monitor	IR, mechanisch	-	Praxis	[Mer-08]
	Monitor	Marker	Rechner	Praxis	[met-08]
	VST HMD, Monitor	Marker	-	Labor	[Pou-01], [BaG-04]
	VST HMD	IR, Marker	-	Labor	[BaG-04]
Produktionsplanung	HMD	Marker	-	Labor	[Alt-03]
	OST/VST HMD	Marker	Marker	Labor	[Frü-04], [Kat-99], [Kat-00], [BrW-04]
	Projektion	Marker	Marker	Praxis	[Fje-99], [Wes-04]
	Monitor	Marker	Rechner	Praxis	[Bad-08]
	Monitor	Marker	Rechner	Praxis	[Bad-08], [Gün-06], [ScD-05]
	HMD	IR, Marker	Rechner, Marker	Labor	[Pat-04]
QS	HMD, Projektor	IR	Rechner	Labor	[ScB-07b]
	HMD, Handheld	Marker	Tastatur, Touchscreen, Fin- germaus	Labor	[Alt-03], [Fri-04]
Schu- lung	VST HMD	Marker	-	Labor	[Zho-03]

Tabelle 3-3: Übersicht über industrielle AR-Anwendungen (mono = monokular, bino = binokular, LA = Look-Around HMD, Marker = optisches Videotracking, L/P = praxisnaher Einsatz)

4 Potenziale und Einsatzbereiche der AR-Kommissionierung

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung der Potenziale des AR-Einsatzes generell und speziell für die Kommissionierung. Ausgehend davon werden geeignete Einsatzszenarien für den Einsatz von Pick-by-Vision vorgestellt.

4.1 Potenziale

Das Fazit von ARVIKA war, dass AR als unterstützendes Medium mit großem Potenzial zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter eingesetzt werden kann, wenn die Hardware verbessert und alltagstauglich wird [Fri-04]. Die Probanden aus der Praxis fanden die AR-Prototypen akzeptabel, aber ergonomische Unzulänglichkeiten bei der Interaktion und der Datenbrille (Kabel, Einschränkung des FoVE) störten [ScL-05]. Bei einer Verfügbarkeit besserer HMDs hat AR erhebliches Einsparpotenzial hinsichtlich Fertigungszeit und Verbesserung der Qualität. Zu beobachten war, dass Probanden die Informationsaufnahme mit Nebentätigkeiten parallelisierten und Suchzeiten eingespart wurden [Alt-03]. Durch die Reduzierung der nicht wertschöpfenden Tätigkeiten und die bessere informationstechnische Versorgung kann eine Produktivitätssteigerung erreicht werden [Pat-04].

4.1.1 Für den AR-Einsatz geeignete Aufgaben

Nicht bei jedem Prozess bringt der AR-Einsatz Vorteile. Um dies zu untersuchen, kann das Modell der Informationsverarbeitung nach Rasmussen mit den folgenden drei Regulationsebenen eingesetzt werden [RaJ-83]³⁴:

- fertigkeitsbasiertes Verhalten: Die Leistungsfähigkeit beruht auf sensomotorischen Fähigkeiten des Menschen. Die Arbeitsschritte werden nicht bewusst reguliert und laufen automatisch und gleichmäßig ab.

³⁴ Das Modell von Rasmussen eignet sich für die Untersuchung des AR-Einsatzes im Produktionsumfeld am besten [Wie-04].

- regelbasiertes Verhalten: Kognitive Subroutinen werden in bekannten Aufgabensituationen bewusst durch gespeicherte Regeln gesteuert. Diese Regeln entstehen durch eigene Erfahrungen oder durch Vorgaben von außen.
- wissens- oder modellbasiertes Verhalten: Darunter wird das Verhalten in unbekanntem und neuartigen Situationen, die nicht durch Rückgriff auf gespeicherte Handlungsprozeduren abgedeckt werden können, verstanden.

Daraus lassen sich Einsatzfelder für AR im industriellen Feld ableiten ([Fri-04], [Oeh-04], [Wie-04]). Im wissensbasierten Verhalten kann AR als Wissensmanagementsystem genutzt werden, das zusätzliche Informationen bereitstellt. Bei regelbasiertem Verhalten bzw. fertigungs- und regelbasierten Aufgabenfolgen ist AR dort nützlich, wo ein Bedarf an zusätzlichen Informationen besteht, der nicht durch die gespeicherten Regeln abgedeckt werden kann. Für hohe fertigungsorientierte Anteile bringt AR keinen Vorteil z. B. im Vergleich zur Papieranleitung, weil die noch unzureichende AR-Ausrüstung während des gesamten Übungsvorgangs getragen werden muss. Die Kommissionierung an sich fällt unter die fertigungs- und regelbasierten Tätigkeiten [Lol-03]. Da die Kommissionierung wegen der Vielzahl von Verfahren, Techniken und Kombinationsmöglichkeiten die schwierigste Aufgabe in der innerbetrieblichen Logistik ist [Gud-05], gehört eine optimale technische Unterstützung des Menschen zu den wichtigsten Erfolgsfaktoren [Mie-06]. Die Unterstützung der Kommissionierung mit AR wird als gut, für Montagetätigkeiten als schlecht eingeschätzt [FrL-06]. Der AR-Einsatz ist von der Höhe der Komplexität der Arbeitsaufgabe abhängig [Alt-03]. Für jede Aufgabe existiert eine kritische Komplexität, die anhand des Parameters Wiederholhäufigkeit abgeschätzt werden kann. Bei einfach auszuführenden Montageschritten bringt eine AR-Unterstützung somit wenige Vorteile. Der Einsatz von Tracking zahlt sich nur bei hoher Variantenzahl aus [Alt-03].

Unterschiedliche Kommissioniersysteme (v. a. in verschiedenen Unternehmen) weisen einen unterschiedlich hohen Komplexitätsgrad auf. Innerhalb eines Kommissioniersystems ist die kritische Komplexität relativ konstant. Die Abarbeitung eines Kommissionierauftrags beinhaltet immer die gleichen Arbeitsschritte, doch die Aufträge unterscheiden sich untereinander in Abhängigkeit der Auftragsstruktur. Dazu können unvorhergesehene Ereignisse wie das Fehlen von Artikeln oder Mindermengen auftreten, die die Komplexität der Aufgabe erhöhen.

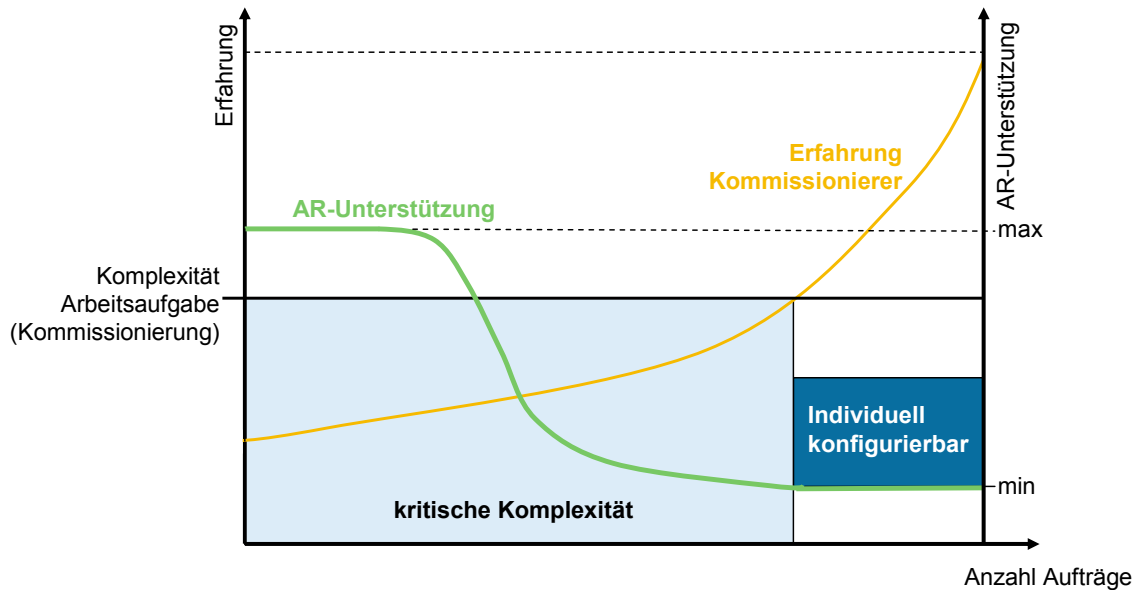


Abbildung 4-1: Abhängigkeit des Grades der AR-Unterstützung von der Komplexität der Arbeitsaufgabe und der Erfahrung des Mitarbeiters)

Ein weiterer Faktor ist der Benutzer des AR-Systems und seine Erfahrung bei der Ausführung der Aufgabe. AR eignet sich für ein Einführungs- und Trainingskonzept zur Qualifikation von Mitarbeitern ([Fri-04], [Oeh-04]). Es ist beim Lernprozess zu berücksichtigen, dass der Mitarbeiter mit mehr Übung weniger AR-Unterstützung benötigt. Die AR-Unterstützung ist somit abhängig vom Erfahrungsgrad des Mitarbeiters. Abbildung 4-1 zeigt, dass die Erfahrung eines Kommissionierers mit der Anzahl der abgearbeiteten Aufträge steigt und für den Anwendungsfall eines Kommissioniersystems mit konstanter Komplexität den maximalen Wert erreicht. Das AR-System sollte so aufgebaut sein, dass der Mitarbeiter am Beginn durch eine detaillierte Vorgabe jedes Prozessschrittes eng geführt wird. Nach und nach werden die Befehle reduziert und nach der Einarbeitung kann er sich das System innerhalb bestimmter Rahmenbedingungen selbst konfigurieren [WaD-07a].

4.1.2 Potenziale in der Kommissionierung

In der Kommissionierung ist in vielen Fällen eine maximale Flexibilität gefordert. Nicht seltene Auftragsschwankungen um bis zu 300 % durch saisonale Unterschiede oder durch Trendartikel (MP3-Player, Handy) sind dafür verantwortlich [Wal-08]. Ein manuelles System Papierlisten (ggf. unterstützt durch Scanner) in Kombination mit

einem flexiblen Mitarbeiterereinsatz (Arbeitszeitkonten, Zeitarbeiter, 400-Euro-Jobs) meistert diese Situation oft am besten. Kurzfristig können 80 bis 90 % der Belegschaft Zeitarbeiter sein. Der Einsatz von Zeitarbeitern nimmt aktuell eher noch zu und langfristig wird ein Anteil von 10 % in der Logistik erwartet [Gil-08]. Die Zeitarbeiter werden für die Be-/Entladung, die Kommissionierung oder die Konfektionierung eingesetzt. Der zunehmende Technikeinsatz führt dazu, dass einfache Tätigkeiten (Hauptereinsatz von Zeitarbeitern) rar werden. Beispielsweise ist der Umgang mit PbV aufwendig zu schulen und kostet viel Arbeitszeit sowohl für den Leiharbeiter als auch für die Kollegen, der ihn schulen muss. Die Einarbeitungszeit ist im Vergleich zur effektiven Arbeitereinsatz bei Leiharbeitern sehr hoch [Lol-03]. Ein gutes Schulungskonzept bzw. eine gute Prozessführung ist für die häufig fachfremden Leiharbeiter sehr wichtig. Kommissionierbereiche mit einheitlichem Anlernkonzept weisen signifikant niedrigere Fehlerquoten auf [Men-99].

	[Alt-03]	[Bra-05]	[Kam-06], [FrL-06]	[Dan-05], [Mue-05]	[ReR-08]	[ScB-07b]	[Tüm-08]
Vergleichstechnik	PL	PL	PL, PL ausgeschaltetes HMD	PL	PL	PDA, stationäre Monitore	PL
Zeit	+	+	nicht untersucht	-	o	-	-
Fehler	+			+	+	-	+
Ergonomie	keine Aussage	-	+	-	+	o	o
Lernkurve		+	nicht untersucht	+	+	+	+
Potenziale AR-Einsatz	Zeiteinsparung, Tracking bei vielen Varianten sinnvoll	Prozessverbesserung, steile Lernkurve	keine Beschwerden durch Visualisierung, sondern durch Tragekomfort	eingebaute Typfehler immer erkannt	nur 1 Fehler bei 832 Positionen	steile Lernkurve, Anzeige von Text am besten	steile Lernkurve, deutlich geringere Fehlerrate

Tabelle 4-1: Potenziale des AR-Einsatzes in der Kommissionierung (PL = Papierliste)

Bei vielen Untersuchungen zum Einsatz von AR konnte festgestellt werden, dass die Werker nach einer kurzen Einweisung und Anlernphase mit dem System gut umgehen konnten [Bra-04]. Bei den Probanden war eine steile Lernkurve zu sehen, die bei der Benutzung von AR stärker als bei den Vergleichstechnologien ausgeprägt ist ([Mue-05], [ScB-07b]). Längere Prozesszeiten am Anfang und unzureichende Hardware führten dazu, dass bei einigen Versuchsreihen die durchschnittliche Kommissionierzeit mit AR geringer war als mit herkömmlichen Technologien ([Mue-05], [Tüm-08]). Dagegen konnten bei anderen Test Einsparungen von ca. 26 % gegenüber dem derzeitigen Ablauf mit Papierliste und von ca. 57 % gegenüber der MTM-

Zeit erreicht werden [Alt-03]. Zu den Prozessverbesserungen gehört neben der Lernkurve und der Zeit auch die Reduzierung bzw. die Vermeidung von Fehlern [Mue-05]. Mit AR wurden mit 0,30 % deutlich weniger Fehler (Typ-, Mengenfehler) gegenüber 0,92 % mit der Liste [Tüm-08] begangen bzw. mit AR trat nur ein Fehler unter 832 Positionen auf [ReR-08]. Durch eine gezielte Führung und Hervorhebung des Lagerplatzes entstanden keine Greiffehler [ScB-08]. Eine Übersicht über die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zum AR-Einsatz in der Kommissionierung zeigt Tabelle 4-1.

4.2 Einsatzbereiche

Der Einsatz von Pick-by-Vision eignet sich nicht für jeden Anwendungsfall. Die Kommissionierung ist der am schwierigsten zu planende Prozess in der Intralogistik, weil er von vielen Einflussgrößen abhängt. Die Artikelstruktur mit den verschiedenen Artikeleigenschaften bestimmt die Aufbauorganisation, die Auftragsstruktur wiederum die Ablauforganisation [VDI3590]. Es fließt noch eine Vielzahl weiterer Faktoren in die Auslegung ein (siehe Tabelle 4-2), so dass die Auslegung jedes Kommissioniersystem anwendungsfallbezogen erfolgen muss. Die Ressourcen Mensch und Technik müssen sehr spezifisch den unternehmenseigenen Herausforderungen angepasst werden [Str-05]. Deshalb gilt es geeignete Einsatzszenarien für Pick-by-Vision anhand bestimmter Einflussfaktoren in der Kommissionierung zu erarbeiten.

Artikelstruktur	Auftragsstruktur	Sonstiges
<ul style="list-style-type: none">▪ Abmessungen▪ Form▪ Gewicht▪ Stapelfähigkeit▪ Temperaturbeständigkeit▪ Mindesthaltbarkeit▪ Gefahrgut▪ Sortimentsgröße▪ Umschlaghäufigkeit▪ etc.	<ul style="list-style-type: none">▪ Anzahl Positionen/Auftrag▪ Anzahl Entnahmeeinheiten pro Position▪ Anzahl Positionen/Periode (Durchschnitt, Maximum)▪ Schwankungen der Auftragslast▪ Wiederholhäufigkeit▪ Auftragsdurchlaufzeit▪ etc.	<ul style="list-style-type: none">▪ Personalkosten▪ Investitionskosten▪ Energiekosten▪ Instandhaltungskosten▪ Flächen-/Raumnutzung▪ politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen▪ etc.

Tabelle 4-2: Einflussfaktoren auf die Auslegung eines Kommissioniersystems

4.2.1 Arten der AR-Unterstützung in der Kommissionierung

AR unter Einsatz einer Datenbrille bietet viele Möglichkeiten der grafischen Unterstützung des Kommissionierprozesses. In diesem Kapitel werden die verschiedenen Möglichkeiten vorgestellt und grob bewertet. Eine genaue Gestaltung der grafischen Benutzeroberfläche erfolgt in Kapitel 6.5.1. Generell sind zwei Arten von AR-Systemen hinsichtlich des Einsatzes eines Trackingsystems zu unterscheiden. Wird kein Trackingsystem eingesetzt, lassen sich nur statische Informationen visualisieren. Dies umfasst die notwendigen Textdaten wie Lagerort, Artikelnummer, Entnahmemenge etc., die mit herkömmlichen Techniken wie mit einer Papierliste oder auf einem MDT ebenso wiedergegeben werden. Über MDT werden teilweise auch Bilder der zu kommissionierenden Artikel oder wie bei Pick-by-Color Symbole zur Identifikation des Lagerfachs (siehe Kapitel 2.6.2.1) ausgegeben. AR-Systeme mit Bereitstellung statischer Informationen wurden bereits mehrfach in industriellen Umgebungen, auch in der Kommissionierung ([Bra-05], [Gün-09]), erfolgreich getestet. Durch eine strikte Führung durch den Kommissionierprozess, eine intuitive Bedienung und das Einblenden der Daten direkt im Blickfeld begingen die Probanden wenige Fehler und lernten schnell mit dem System umzugehen. Allerdings waren die Systeme ohne ein zusätzliches Hilfsmittel zur Vermeidung von Fehlern ausgestattet, so dass man sich darauf verlassen musste, dass die Kommissionierer die reale Artikelnummer mit der am HMD abglichen. Dies erfolgte aus Zeitdruck oft nicht und wenn der Lagerplatz falsch abgelesen wurde, beging der Benutzer einen Fehler [Gün-09].

Der Einsatz eines Trackingsystems bietet dahingehend neue Möglichkeiten. Derartige AR-Systeme wurden ebenfalls in der Kommissionierung getestet. Der Fokus lag aber entweder bei der technischen Umsetzung, ohne auf den Anforderungen aus der Kommissionierung (z. B. Lageraufbau, Benutzereingaben) einzugehen ([Mue-05], [ScB-08]) oder auf der Untersuchung der durch den Datenbrilleneinsatz hervorgerufenen Beanspruchung [Tüm-08]. Um ein optimal an die Anforderungen der Kommissionierung angepasstes Pick-by-Vision-System zu entwickeln, ist zunächst der Kommissionierprozess zu betrachten und zu untersuchen, an welchen Stellen eine dynamische Unterstützung eingesetzt werden kann.

Der konventionelle manuelle Kommissionierprozess lässt sich in die drei großen Bausteine Vorbereiten, den eigentliche Kommissioniervorgang und die Nachbereitung zerlegen [Vog-97] (siehe Abbildung 4-2). Unter Vorbereitung werden Aufgaben

verstanden, wie das Anmelden des Kommissionierers, der Weg zur Basis oder das Holen eines Sammelbehälters. Der Kommissioniervorgang lässt sich in den Weg vom Ausgangspunkt zum Entnahmeort, die Wege zwischen den Entnahmeorten und dem Weg zum Abgabeort sowie die Entnahme, die Ablage in den Sammelbehälter und die Abgabe des Auftrags unterteilen. Die Wege vom Ausgangspunkt und zum Abgabeort sowie die Abgabe sind einmalige Schritte während eines Kommissioniervorgangs. Die Entnahme, die Ablage und die Wege zwischen den Entnahmeorten erfolgen öfter und iterativ. Diese Bausteine lassen sich noch weiter unterteilen. Die „Weg-Bausteine“ sind alle gleich aufgebaut. Der Kommissionierer braucht zunächst die Information, wohin er gehen muss, dann erfolgen die eigentliche Bewegung und die Ankunft am entsprechenden Zielort. Bei der Entnahme erfolgt zuerst die Identifikation des entsprechenden Lagerorts, bevor der Artikel ggf. vereinzelt und gegriffen sowie in einem fließenden Übergang abgelegt wird, wobei der Ablageort identifiziert werden muss. Dieser Prozess kann je nach Entnahmemenge ebenfalls mehrfach erfolgen. Nach jeder Position ist ein Baustein für die Quittierung vorzusehen. Nach der Identifizierung des Abgabeorts erfolgen die Abgabe und eine Quittierung des Auftrags. Zur Nachbereitung des Auftrags gehören z. B. die Abgabe des Sammelbehälters, die Verpackung des Auftrags, der Weg zurück zur Basis oder auch das Abmelden vom System. Das Verpacken wird nicht weiter betrachtet.

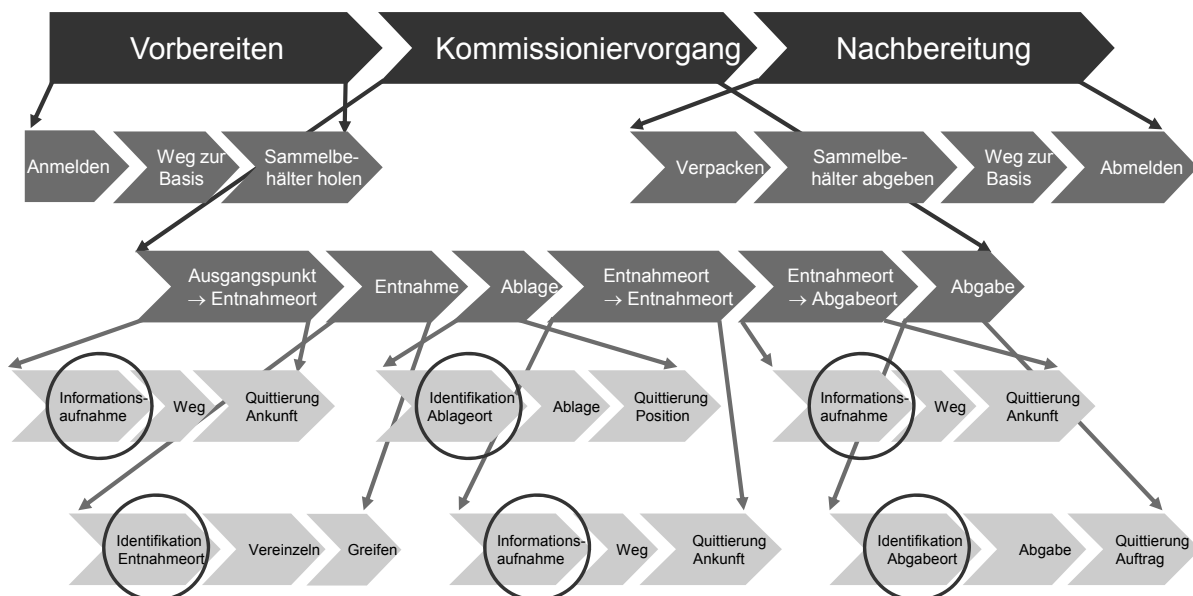


Abbildung 4-2: Kommissionierprozess mit Ansatzpunkten für den AR-Einsatz

Die vorbereitenden und nachbereitenden Schritte sind für jeden Auftrag gleich und weisen eine hohe Wiederholhäufigkeit auf, so dass diese nicht mit AR unterstützt

werden müssen. Beim Kommissionierprozess interessieren vor allem die mentalen Aufgaben wie die Aufnahme von Informationen und die Identifikation von Orten (siehe Abbildung 4-2). Während die Informationsaufnahme auch ohne Trackingsystem über die Datenbrille erfolgt, kann das Trackingsystem bei der Identifizierung von Orten helfen, weil ein Bezug zwischen der realen Umgebung und der Blickrichtung des Benutzers hergestellt werden kann. Der erste zu identifizierende Ort ist der Lagerplatz. Dabei lässt sich zwischen zwei Arten der Unterstützung in Anlehnung an die Aufteilung der Kommissionierzeit unterscheiden. Zum einen ist das die Wegfindung, die den Benutzer von seinem Standort in die Nähe des Lagerorts bringt und zum anderen ist das die Unterstützung bei der Entnahme, also dem Greifvorgang. Anschließend muss der Ablageort der Artikel identifiziert werden, wobei sich AR nur beim Mitführen mehrerer Sammelbehälter einsetzen lässt. Der dritte zu identifizierende Ort ist der Abgabeort des Sammelbehälters. Da sich dieser meistens auch nicht ändert, ist dies kein Einsatzbereich für AR.

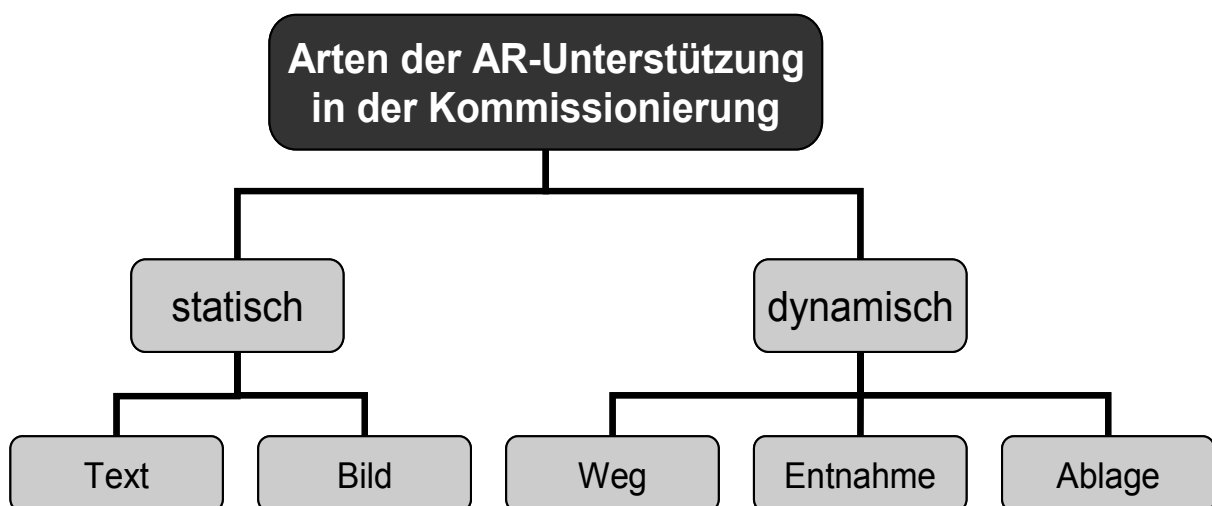


Abbildung 4-3: Arten der AR-Unterstützung in der Kommissionierung

Somit lassen sich mit der Wegfindung, der Entnahme und der Ablage drei Arten der dynamischen AR-Unterstützung festhalten (siehe Abbildung 4-3). Der Wegfindung wird wenig Potenzial eingeräumt, weil auch neue Kommissionierer schnell den Aufbau des Lagers kennenlernen und den groben Weg zum Entnahmeort problemlos finden [Gün-09]. Die Unterstützung des Greifvorgangs hat das größte Potenzial, weil sie die Suchzeit nach dem Lagerplatz durch eine direkte optische Hervorhebung reduziert. Der Kommissionierer muss nicht mehr die Lagerfachbeschriftung von einem

Medium ablesen und diese Information in die reale Umgebung übertragen. Nach DIN 55350 gibt es drei Arten von qualitätsbezogenen Kosten: Fehlerverhütungs-, Prüf- und Fehlerkosten, die zur Fehlervermeidung, -erkennung und -behebung aufgewandt werden [DIN55350]. Pick-by-Vision zielt direkt darauf ab, durch die optische Hervorhebung des Lagerfachs zur Fehlervermeidung beizutragen. Vor allem bei schwer unterscheidbaren Artikeln im Greifraum kann die Entnahme vereinfacht werden [Mue-05]. Die Informationsbereitstellungstechnologie trägt somit ohne zusätzliche Hilfsmittel zu einer Fehlervermeidung bei, um aufwändige Nacharbeiten zu reduzieren. Nicht nur bei der Entnahme, auch bei der Ablage können Fehler entstehen, so dass es ggf. auch Sinn macht, die Auftragswanne optisch hervorzuheben [Gün-04].

4.2.2 Einflussfaktoren auf den Einsatz von Pick-by-Vision

Im Folgenden werden systematisch unter Zuhilfenahme der in der VDI-Richtlinie 3590 vorgenommenen Unterteilung des Kommissioniersystems (siehe Kapitel 2.5) mögliche Anwendungsszenarien für die AR-unterstützte Kommissionierung von Stückgütern erarbeitet.

Organisationssystem

Die Artikeleigenschaften spielen eine wesentliche Rolle für den Aufbau des Kommissioniersystems. Die daraus folgende Aufteilung des Kommissionierbereichs in mehrere Zonen ist unabhängig von der Informationsbereitstellung. Bei der Ablauforganisation entscheidet sich, ob die Aufträge seriell oder parallel sowie ein- oder mehrstufig das Kommissioniersystem durchlaufen. Bei der parallelen Abarbeitung der Aufträge führt der Kommissionierer mehrerer Sammelbehälter mit sich, wodurch AR bei der Ablage genutzt werden kann.

Die Betriebsorganisation ist u. a. für die Kommissionierstrategien verantwortlich. Es lassen sich die Belegungs-, die Reserveplatz-, die Bearbeitungs-, die Entnahme-, die Bewegungs-, die Nachschub- und die Leergutstrategie unterscheiden [Gud-05]. Der Nachschub und das Leergutmanagement werden nicht näher betrachtet. Die Bewegungs- und Entnahmestrategien werden vom WMS übernommen, aber das AR-System kann diese mit der entsprechenden Visualisierung unterstützen.

Die Belegungsstrategie ordnet die Artikel einem Lagerplatz fest zu (statisch) oder belegt die freien Lagerplätze nach einer bestimmten Strategie (dynamisch, chaotische Lagerung). AR hat bei chaotischer Lagerung größeres Potenzial, denn selbst der erfahrene Mitarbeiter braucht Hilfe beim Auffinden der ständig wechselnden Lagerorte der Artikel. Allerdings orientiert sich der Kommissionierer bei der Auffindung der Lagerorte nicht an den Artikeln, sondern an der Lagerfachbezeichnung, welche sich durch die Belegungsstrategie nicht ändert. Erfahrene Kommissionierer wissen bei einem überschaubaren Sortiment und bei einer statischen Lagerfachbeschriftung, wohin sie gehen müssen. Dieses Wissen setzen sie unabhängig von der Kommissioniertechnologie ein. Mit der Belegungsstrategie wird herkömmlich versucht, ähnliche Artikel möglichst weit auseinander zu lagern und dem Kommissionierer in seinem jeweiligen Greifbereich ein möglichst heterogenes Artikelspektrum anzubieten, um Typfehler zu vermeiden. Pick-by-Vision bringt Vorteile bei Pickfronten mit ähnlichen Artikeln. Einerseits ist es möglich durch das Einblenden des Artikelbildes ein eindeutiges Unterscheidungsmerkmal in dem Bild hervorzuheben. Der Kommissionierer kann die entsprechenden Artikel durch einen gezielten Blick auf das Unterscheidungsmerkmal eindeutig identifizieren. Andererseits vereinfacht der Einsatz der optischen Hervorhebung des Lagerfachs durch eine dynamische Visualisierung den Greifvorgang [Dan-05].

Bei der Reserveplatzstrategie ist es ähnlich. Beim Flip-Flop-Verfahren³⁵ kann gezielt die Entnahmeeinheit hervorgehoben werden, um sie von der Reserveeinheit abzugrenzen. Das starre Flip-Flop-Verfahren lässt sich mit Pick-by-Vision unterstützen. Ist eine Bereitstelleinheit aufgebraucht, wird der Kommissionierer vom AR-System zur Reserve-Bereitstelleinheit geleitet.

Die Bearbeitungsstrategie stellt die Aufträge zusammen. Pick-by-Vision ist ein papierloses System, das auch bei einer Stapelverarbeitung (floating oder fixed batch) die Auftragsdaten darstellt. Bei PbV spielt die Wegzeit zwischen aufeinanderfolgenden Entnahmeorten eine wesentliche Rolle. Liegen diese zu nah zusammen, kann es zu Verzögerungen kommen, weil der Kommissionierer die Sprachausgabe abwarten oder die Eingabe noch erledigen muss. Das Potenzial der Parallelisierung der Inter-

³⁵ starres Flip-Flop-Verfahren: Jeder Artikel hat im Zugriffsbereich mindestens zwei fest zugeordnete Bereitstellplätze, auf denen neben- oder hintereinander eine angebrochene Zugriffseinheit und eine volle Zugriffsrerveeinheit stehen [Gud-05].

aktion mit physischen Vorgängen greift nicht. Ablesevorgänge vom HMD sind in dieser Hinsicht unkritischer, wobei bei Pick-by-Vision die Systemeingaben mit einem ausgewählten Interaktionsgerät noch zu berücksichtigen sind. Beim parallelen Bearbeiten von Aufträgen lässt sich das jeweilige Ablagefach optisch hervorheben und die Abarbeitung von Eilaufträgen kann sich durch eine spezielle Visualisierung unterscheiden.

Materialflusssystem

Die Bereitstellung bestimmt, ob sich der Kommissionierer durch das Kommissioniersystem bewegen muss. AR bietet bei einem konventionellen MzW-System neben dem Greif- und Ablagevorgang die Möglichkeit der Unterstützung der Wegfindung. Neben der generellen Notwendigkeit der Wegfindung ist zu beachten, dass ein großer Lagerbereich vom Trackingsystem abgedeckt werden muss. Wird nach dem WzM-Prinzip kommissioniert, greift das Potenzial der Hervorhebung des Entnahme- und Ablageorts.

Eignung von Lagertypen für Pick-by-Vision		
sehr gut geeignet	geeignet	nicht geeignet
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fachbodenregallager ▪ Durchlaufregallager (manuell bedient) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bodenlagerung ▪ Block-/Zeilenlager ▪ Einfahrregallager ▪ Kragarmregallager ▪ Durchlaufregallager (mechanisierte Bedienung mit Flurförderzeug) ▪ Paletten-/Hochregallager (mechanisierte Bedienung mit Flurförderzeug) ▪ Verschieberegallager ▪ Umlaufregallager 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ (Paletten-) Hochregallager (automatisch bedient) ▪ Behälterregallager (AKL) ▪ Tunnelregallager ▪ Einschubregallager

Tabelle 4-3: Eignung von bestimmten Lagertypen für Pick-by-Vision

Der Lageraufbau wird in diesem Zusammenhang auch untersucht (siehe Tabelle 4-3). Die statische Lagerung ist oft mit MzW verbunden, bei der v. a. Fachbodenregale und Bodenlagerung eingesetzt werden. Bei der dynamischen Lagerung wird die Ware zum Kommissionierer transportiert. Bei feststehenden Regalen und bewegter Ware entspricht dies dem WzM-Prinzip. Der dahinterliegende Lagertyp ist irrelevant. Bei bewegten Regalen und dem MzW-Prinzip erfolgt die Kommissionierung v. a. entlang von Durchlauf-, Umlauf- oder Verschiebebodenregalen. Die Größe bzw. Komplexität des Lager- bzw. Kommissionierbereichs des einzelnen Mitarbeiters spielt

kaum eine Rolle, denn aus ergonomischen Gründen ist dieser nicht so groß, als dass er ihn – ggf. nach einer Einarbeitungszeit – nicht mehr überblicken kann.

Ein weiterer Faktor ist die Bereitstellereinheit, die hauptsächlich nach den Artikeleigenschaften, aber auch nach der eingesetzten Fördertechnik oder Durchsatzanforderungen ausgewählt wird. Die Bereitstellereinheit bestimmt die Größe des Lagerplatzes, der durch AR optisch hervorgehoben wird. Dies hat einen Einfluss auf die erforderliche Genauigkeit des Trackings und auch die Visualisierung, weil das FoVD nur eine bestimmte Größe hat. Eine Palette hat geringere Genauigkeitsanforderungen, aber bei der Anzeige eines virtuellen Rahmens um die Palette kann das FoVD ggf. zu klein sein, so dass der gesamte Rahmen meist nicht sichtbar ist. Wie die Artikel in der Bereitstellereinheit liegen, geordnet oder ungeordnet, spielt keine Rolle, weil nicht diese, sondern das Lagerfach identifiziert werden soll. Geordnet bereitgestellte Artikel sind von automatischen Sensoren einfacher zu erkennen als ungeordnet bereitgestellte (z. B. der schwierige „Griff in die Kiste“ bei Robotern).

Der Kommissionierer kann sich ein- oder zweidimensional mit oder ohne Gangwechsel sowie manuell, mechanisch oder automatisch zum Entnahmeort fortbewegen. Die manuelle Fortbewegung durch das Lager erfolgt eindimensional in einer Regalgasse oder zweidimensional mit Gassenwechsel und es gelten die gleichen Aussagen wie bei der statischen Bereitstellung. Eine AR-unterstützte Wegfindung kann eingesetzt werden, aber deren Nutzen ist fraglich. Bei der mechanischen Fortbewegung nutzt der Kommissionierer ein Flurförderzeug, beispielsweise einen Niederhubkommissionierer, einen Kommissionierstapler oder ein RBG, das er selbst steuert. Der Einsatz von Datenbrillen ist beim Einsatz mit Fahrzeugen kritisch zu bewerten. OST-HMDs eignen sich nicht für den Einsatz auf bewegten Fahrzeugen und sollten nicht in überfüllten oder dynamischen Umgebungen, wie z. B. einem Lager, eingesetzt werden, wo visuelle Aufmerksamkeit gefordert ist [Lar-02]. Arbeitsschützer und Mediziner schließen auch TFT-basierte Look-Around Datenbrillen im Umfeld mit Staplerbetrieb aus, weil eine Verdeckung des Gesichtsfeldes zur erhöhten Unfallgefahr führen würde ([Bra-05], [Pel-90]). Beim Einsatz im Stapler sollte auch beachtet werden, dass sich der Mitarbeiter innerhalb einer Fahrerkabine befindet, die seinen Sichtbereich einschränkt. Ein Teil der Kabine kann das optisch hervorzuhebende Lagerfach verdecken, wenn es sich zwischen der Datenbrille und dem Lagerfach befindet. Dies soll aber den Einsatz von AR auf Flurförderzeugen nicht ausschließen. In modernen

Flurförderzeugen ist häufig ein stationäres Display integriert und teilweise ist eine Kamera an der Gabel angebracht, um Arbeiten in den oberen, schlecht einsehbaren Regalbereichen zu unterstützen. Dazu wird die Position der Flurförderzeuge im Lagerbereich über RFID oder Funk [Bar-08] bereits getrackt. Dies sind Voraussetzungen für den Einsatz von monitorbasierter AR, die aber in dieser Arbeit nicht näher betrachtet wird. Bei der zweidimensionalen Fortbewegung ohne und teilweise auch mit Gassenwechsel verfährt der Kommissionierer automatisch auf einem Flurförderzeug. Er braucht sich um die Fortbewegung nicht kümmern, so dass Datenbrillen ohne arbeitsschutzrechtliche Bedenken zur Hervorhebung des Entnahme- und Abgabortes eingesetzt werden können.

Die Entnahme ist der zentrale Prozess in der Kommissionierung [Gud-05] und die wichtigste durch AR zu unterstützende Aufgabe. Eine automatische Entnahme wird durch eine Maschine ausgeführt und nicht betrachtet. Bei der mechanisierten Entnahme benutzt der Kommissionierer ein Hilfsmittel, weil z. B. der Artikel zu schwer ist, oder er lagert ganze LHM, z. B. Paletten, mit einem Gabelstapler aus. Der Einsatz eines Flurförderzeugs ist nicht nur kritisch zu sehen, sondern die Handhabung ganzer Paletten durch ein Flurförderzeug ist weniger für die Kommissionierung als für Reserve-/Nachschublager interessant. Der Einsatz eines Hilfsmittels ist zu spezifisch, so dass diese beiden Fälle nicht weiter betrachtet werden. Es erfolgt eine Konzentration auf Systeme mit manueller Entnahme. Es können ein oder mehrere Entnahmeeinheiten pro Zugriff entnommen werden. Auf die Visualisierung hat dies keinen Einfluss, aber wenn das Pick-by-Vision-System so konzipiert ist, dass beide Hände frei sind, ist es einfacher, mehrere Artikel gleichzeitig zu entnehmen.

Die Abgabe des Kommissionierauftrags kann in statisch/dynamisch oder zentral/dezentral unterschieden werden. Entscheidend für Pick-by-Vision ist nicht die Abgabe der Sammel-, sondern der Entnahmeeinheit (Ablage). Wenn die Artikel wie bei Pick-to-Belt direkt auf eine Fördertechnik abgelegt werden (dynamisch), ist eine AR-Unterstützung nicht nötig. Die Hervorhebung ist nur bei statischen Ablageorten sinnvoll, unabhängig davon, ob der Kommissionierer einen Sammelbehälter mitführt (dezentral) oder er die Artikel an einem stationären Arbeitsplatz auf einer Palette stapelt (zentral). Pick-by-Vision bietet Vorteile, wenn der Kommissionierer mehrere Abgaborte zur Auswahl hat. Die Abgabe kann geordnet oder ungeordnet erfolgen, wobei

bei einer geordnete Abgabe z. B. durch AR das Palettierschema angezeigt werden kann.

Die Zusammenfassung der für Pick-by-Vision geeigneten Materialflusssysteme zeigt Abbildung 4-4.

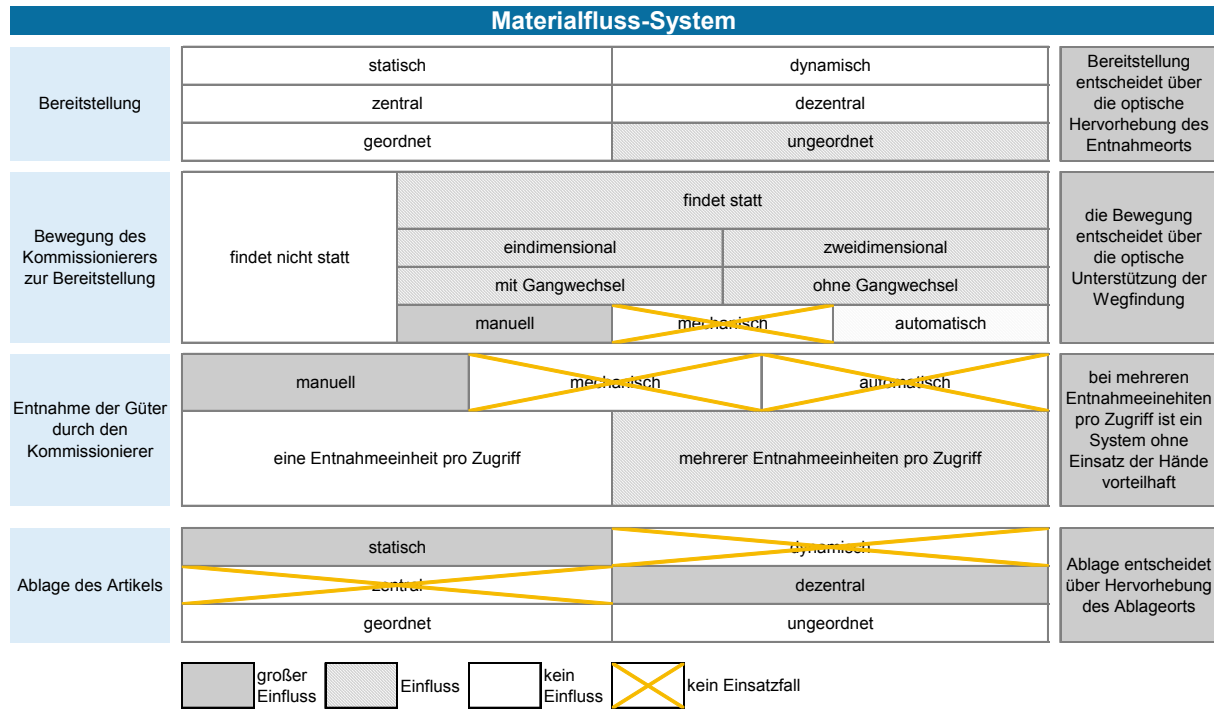


Abbildung 4-4: Aufteilung des Materialflusssystems und für den Einsatz von Pick-by-Vision geeignete Materialflusstypen

Informationssystem

Die Erfassung der Kundenaufträge ist für die Kommissioniertechnik irrelevant. Der Auftrag muss für papierlose Kommissioniertechniken wie Pick-by-Vision geeignet aufbereitet werden. Bei der Erstellung von Auftragsgruppen kann mit AR die Ablage der Artikel in den richtigen Behälter unterstützt werden. Die Weitergabe der Informationen an den Lager- und Kommissionierbereich muss bei Pick-by-Vision papierlos online in Echtzeit oder ggf. offline erfolgen. Ob eine Einzelposition oder mehrere Positionen kommissioniert werden, spielt keine Rolle. Die Quittierung kann je Entnahmeeinheit, je Position oder über alle Positionen in Kombination mit einer 100 % Kontrolle am Ende erfolgen. Bei der manuellen Quittierung bei Pick-by-Vision sind alle drei Varianten möglich und werden mit dem entsprechenden Eingabegerät manuell ausgeführt. In dieser Arbeit wird nur die Quittierung nach jeder Position betrachtet.

Zusammenfassung

Die Artikelstruktur spielt direkt keine Rolle auf den Einsatz von Pick-by-Vision, weil nicht der Artikel, sondern der Lagerplatz mit Pick-by-Vision hervorgehoben wird. Indirekt wirkt sich die Artikelstruktur ebenso wie die Auftragsstruktur auf den Aufbau eines Kommissioniersystems aus. Tabelle 4-4 zeigt eine Übersicht über mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz von Pick-by-Vision.

Einflussfaktoren auf Pick-by-Vision hinsichtlich des Kommissioniersystems		
Teilsystem	Realisierungsmöglichkeit	Einfluss auf Pick-by-Vision
Organisationssystem		
Aufbauorganisation	mehrzonig	in verschiedenen Zonen einsetzbar
Ablauforganisation	paralleles Kommissionieren von Aufträgen	Hervorhebung Ablageort
Betriebsorganisation	Belegungsstrategie → homogene Greiffront	Hervorhebung Entnahmeort Einblenden von Bildern
Materialflusssystem		
Bereitstellung	Größe der Bereitstelleinheiten	Hervorhebung Entnahmeort (Genauigkeit Tracking, FoVD)
Fortbewegung	manuelle Fortbewegung	Unterstützung Wegfindung
Entnahme	manuell	Grundvoraussetzung
	mehrere Artikel im Zugriff	hands-free
Abgabe	nicht die Abgabe der Sammel-, sondern der Entnahmeeinheit (statisch)	Hervorhebung Ablageort, Palettierschema
Informationssystem		
Auftragserfassung	-	-
Auftragsaufbereitung	Aufbereitung	Grundvoraussetzung
Weitergabe	papierlos	online
Quittierung	manuell nach jeder Position	Verzicht auf zusätzliche Hilfsmittel

Tabelle 4-4: Einflussfaktoren auf den Einsatz von Pick-by-Vision hinsichtlich des Kommissioniersystems (Gliederung nach [VDI3590])

4.2.3 Mögliche Einsatzszenarien von Pick-by-Vision

In diesem Kapitel werden vier Einsatzszenarien vorgestellt, bei denen sich der Einsatz von Pick-by-Vision besonders erfolgversprechend darstellt. Die größten Potenziale von Pick-by-Vision liegen bei Systemen mit einem hohen Anteil an manuellen

Tätigkeiten, so dass eine Betrachtung von Anwendungen mit Flurförderzeugeinsatz nicht erfolgt.

	konventionell	entlang einer Regalzeile	Kommissioniernest	stationärer Platz
Bereitstellung	statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
	Fachboden- / Boden-Zeilenlager	Durchlaufregal	Fachboden- / Durchlaufregal	irrelevant
	KLT / Palette	KLT / ohne LHM	KLT / ohne LHM	KLT
	dezentral	dezentral	zentral	zentral
	ungeordnet			
Bewegung des Kommissionierers	eindimensional mit Gangwechsel	eindimensional ohne Gangwechsel	eindimensional ohne Gangwechsel	ohne Bewegung
	manuell			
Entnahme	manuell			
	eine oder mehrere Artikel im Zugriff			
Abgabe des Auftrags	statisch			
	zentral	dezentral	zentral	zentral
	geordnet			
Ablauforganisation (Sammeln) → Ablage der Artikel	seriell / parallel	seriell	seriell	parallel
	statisch			
	dezentral	zentral	zentral	dezentral
	ungeordnet			
Artikelstruktur	mittel bis groß	Kleinteile	Kleinteile	klein bis mittel
	vielfältig	beschränkt	beschränkt	vielfältig
	Schnell- und Langsamdreher	Schnelldreher	Schnell- und Langsamdreher	Schnell- und Langsamdreher
Auftragsstruktur	mittlerer Durchsatz	hoher Durchsatz	hoher Durchsatz	hoher Durchsatz
	wenige bis mittlere Anzahl Pos/Auftrag	wenige Pos/Auftrag	wenige Pos/Auftrag	mittlere bis große Anzahl Pos/Auftrag
AR-Unterstützung	Weg	Weg (eingeschränkt)	-	-
	Entnahme			
	Ablage	-	-	Ablage

Tabelle 4-5: Übersicht über mögliche Einsatzszenarien von Pick-by-Vision

In der Literatur werden konventionelle MzW-Systeme, Kommissioniernester und stationäre Kommissionierarbeitsplätze als die gebräuchlichsten manuellen Systeme genannt ([Arn-05], [Sad-07]). Des Weiteren wird die Kommissionierung entlang einer Regalzeile betrachtet, weil dies innerhalb DPS- oder PbL-Anlagen ein weit verbreite-

ter Einsatzfall ist. In einem relativ kleinen Arbeitsbereich ist eine hohe Kommissionierleistung gefordert, wobei die AR-Unterstützung vor allem auf die Entnahme abzielt. Diese vier Szenarien decken die vier unterschiedlichen Arten der Bereitstellung ab (statisch/dynamisch und zentral/dezentral) [ten-07]. Eine Übersicht der möglichen Einsatzszenarien zeigt Tabelle 4-5.

4.2.3.1 Szenario 1: Konventionelles Kommissionieren

Unter konventionellem Kommissionieren wird ein MzW-System mit manueller Fortbewegung und Entnahme verstanden. Dies ist immer noch am weitesten verbreitet [Gud-05], weil es mit minimalem technischem, organisatorischem und finanziellen Aufwand umzusetzen ist. Deshalb bietet es eine hohe Flexibilität gegenüber schwankenden Durchsatzanforderungen und Sortimentsänderungen. Es eignet sich für alle Arten von Waren, von kleinen bis zu großen, schweren und sperrigen Warenstücken. Nachteilig wirken sich ein breites Sortiment sowie große Bereitstellereinheiten auf die Wege mit der Folge eines hohen Kommissionierer- und Gerätebedarfs aus. Um diese Nachteile zu minimieren, ist eine greifoptimale Gestaltung der Bereitstellplätze, eine wegoptimale Anordnung und Dimensionierung der Regale, geeignete Nachschub- und Wegstrategien, sowie der Einsatz geeigneter Technik und Steuerung nötig. Pick-by-Vision bietet hierbei die Möglichkeit, den Kommissionierer bei seinen langen Wegen, der Entnahme und bei der Ablage der Entnahmeeinheiten optisch zu unterstützen.

Der Kommissionierbereich besteht aus einem Fachbodenregallager und einem Boden-Zeilen-Lager (siehe Abbildung 4-5). Im Fachbodenregallager werden die Artikel in Behältern bereitgestellt. Der Kommissionierbereich erstreckt sich über mehrere Gassen und somit ergeben sich mittlere bis große Entfernungen zwischen den Lagerplätzen. Es stehen ein oder mehrere Artikel in freier Lagerplatzanordnung im Zugriff. Es handelt sich um Langsamdreher aus einem mittleren bis großen Sortiment (7.000 Artikel). Die Schnelldreher werden auf Paletten in freier Lagerplatzordnung bereitgestellt, wobei die Entfernungen zwischen den Lagerplätzen gering sind. Das Sortiment umfasst kleine bis mittelgroße Teile mit einer großen Vielfalt. Es wird auftrags-, aber auch artikelorientiert kommissioniert, d. h. dass paralleles Kommissionieren mehrerer Aufträge möglich ist. Die Aufträge umfassen eine kleine bis mittlere Anzahl an Positionen (2 bis 10). Der Kommissionierer führt einen Kommissionierwagen

mit sich, auf dem er die Sammelbehälter abstellt. Diese holt er an der Basis und gibt sie nach Fertigstellung der Aufträge auf einen Rollenförderer ab, der die Aufträge zur Verpackung transportiert.

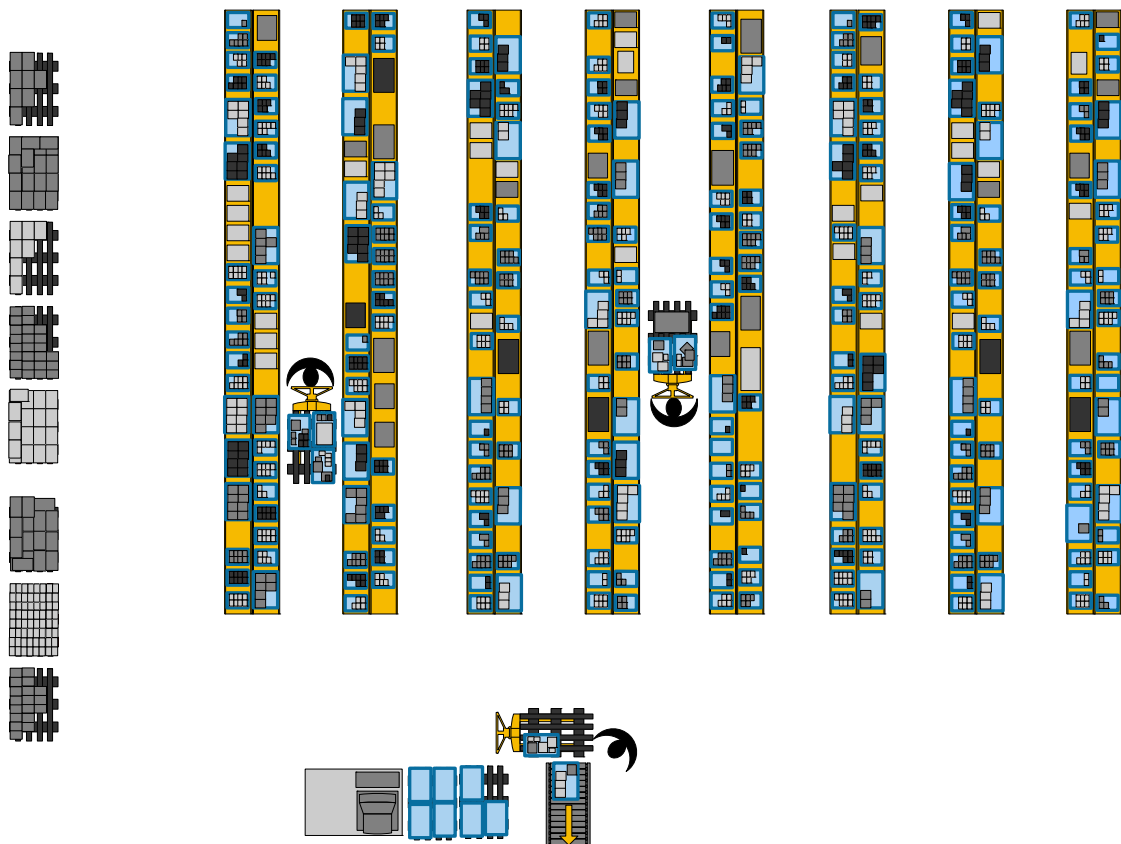


Abbildung 4-5: Konventionelles Kommissionieren mit einem Schnelldreherbereich auf Paletten und einem Fachbodenregallager für Langsamdreher

Herkömmlich verwendet der Kommissionierer Papierlisten oder wird durch ein MDT oder ein PbV-System unterstützt. Dieses Einsatzszenario bietet alle Möglichkeiten der visuellen Unterstützung durch AR. Es können Text und Bildinformationen ebenso wie dynamische 3D-Geometrien angezeigt werden. Das Lager enthält ähnliche Artikel, die nebeneinander liegen können³⁶, so dass Pick-by-Vision mit einem Bild, das die markanten Unterschiede hervorhebt, oder mit einer optischen Hervorhebung des Lagerplatzes Fehler vermeidet. Der Kommissionierer muss einen relativ großen Bereich mit einer chaotischen Lagerung bearbeiten, so dass es ihm unmöglich ist, mit steigender Erfahrung die Lagerorte der Artikel zu kennen. Somit kann er mit AR bei der Wegfindung unterstützt werden. Da er ggf. auch mehrere Aufträge parallel bear-

³⁶ Aufgrund der Einfachheit dieses Kommissioniersystems hat das eingesetzte WMS keine Funktion, ähnliche Artikel nicht nebeneinander einzulagern.

beitet, nimmt er bis zu vier Sammelbehälter auf seinem Kommissionierwagen mit. Bei der Ablage kann der entsprechende Sammelbehälter durch AR markiert werden. Dieses Szenario bietet nicht nur viele Einsatzfälle für AR, sondern stellt auch hohe Anforderungen. Der Trackingbereich ist sehr groß und das Fachbodenregal erfordert eine relativ hohe Genauigkeit. Dem Szenengenerator muss nicht nur die Position und Blickrichtung des Kommissionierers sowie der Lageraufbau bekannt sein, sondern auch die Position und Orientierung des Kommissionierwagens bzw. der einzelnen Sammelbehälter.

4.2.3.2 Szenario 2: Kommissionierung entlang einer Regalzeile

Entlang eines 20 m langen Durchlaufregallagers werden die Artikel in Behältern oder direkt im Regal bereitgestellt, was geringe Entfernungen zwischen den Lagerplätzen bedingt (siehe Abbildung 4-6). Es stehen ein oder mehrere Artikel in freier Lagerplatzanordnung im Zugriff. Werden in dem überschaubaren Kommissionierbereich immer die gleichen Artikel bereitgestellt, ist das Sortiment klein. Handelt es sich um ein DPS, d. h. das ein RBG die Bereitstelleneinheiten je nach Zugriffshäufigkeit in dem Bereich austauscht (dynamische Bereitstellung), erweitert sich das Sortiment, das der Kommissionierer in seinem Bereich handhaben muss. Somit bearbeitet er ein mittelgroßes Sortiment (2.500 Artikel) aus Kleinteilen mit einer großen Vielfalt. Nach dem Pick & Pack Verfahren wird auftragsorientiert kommissioniert und die Aufträge enthalten nur wenige Positionen (1 bis 3). Der Sammelbehälter, d. h. die Verpackungseinheit auf einem Tablar, steht auf einem Rollenförderer. Er kann den Behälter von Position zu Position mitziehen und schiebt ihn nach Beendigung des Auftrags auf einen weiteren Rollenförderer, der den Sammelbehälter zur nächsten Kommissionierstation oder zur Verpackung transportiert. Der Übergabepunkt für den Sammelbehälter ist beispielsweise in der Mitte der Regalzeile (Basis).

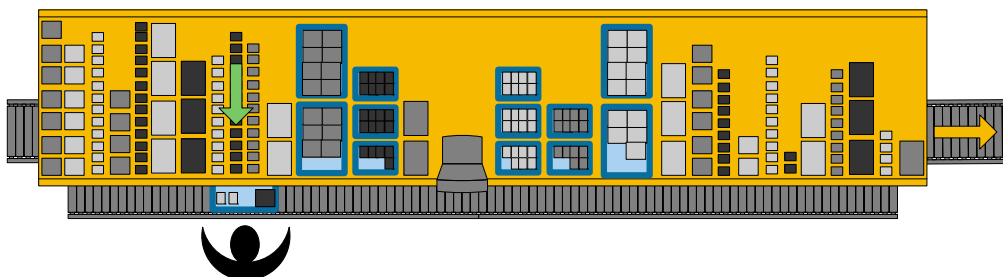


Abbildung 4-6: Kommissionierung entlang einer Regalzeile

Dies ist ein klassischer Fall für den Einsatz eines PbL-Systems. An der Basis befindet dabei meist noch ein Monitor und ein Rechner für weitere Informationsein- und ausgaben. Der Einsatz eines Pick-by-Vision-Systems zielt ebenfalls auf den menschlichen visuellen Sinn ab. Die optische Hervorhebung des Lagerfachs erfolgt aber nicht mehr dort, sondern über das HMD. Dadurch ist der Regalaufbau einfacher zu gestalten und flexibler für Umbauarbeiten und die Abarbeitung der Aufträge ist nicht mehr sequenzbehafet wie bei PbL [Gün-04]. Neben der Hervorhebung des Lagerfachs kann eine einfache Wegfindung eingesetzt werden. Diese muss dem Kommissionierer nicht mehr den Weg durch das Lager vorgeben, aber sie kann ihm am Beginn des Auftrags von der Basis aus die Richtung anzeigen. Der Suchaufwand nach dem ersten Lämpchen entfällt. Da auch eine Hervorhebung der Ablage keinen Nutzen bringt, müssen insgesamt weniger Daten mit AR angezeigt werden. Im Vergleich zu Szenario 1 ist der Trackingbereich kleiner (ca. 20 x3 m) und überschaubarer. Die Komplexität des Aufbaus ist deutlich geringer, aber Pick-by-Vision muss sich in diesem Szenario mit dem schnellern und wenig fehleranfälligen PbL messen.

4.2.3.3 Szenario 3: Kommissioniernest

In einem Kommissioniernest werden kleine Artikel und das gesamte Sortiment in Reichweite des Kommissionierers in U-förmig aufgebauten Durchlauf- oder Fachbodenregalen bereitgestellt. (siehe Abbildung 4-7). Der Kommissionierer erhält seine Informationen von einem stationären Monitor an der Vorderseite. Oft sind die Regale mit einem PbL-System ausgestattet. Papierlisten oder MDT machen in diesen kleinen Bereichen keinen Sinn. Der Monitor zeigt auch die Richtung des nächsten Artikels über Pfeile an. Es werden kleinvolumige Artikel in einer chaotischen Lagerplatzanordnung bereitgestellt und es befinden sich mehrere Artikel im Zugriff. Das Sortiment in einem Kommissioniernest ist überschaubar, kann sich aber zwischen den einzelnen Nestern verschieben (insgesamt ein mittelgroßes Sortiment mit 2.500 Artikeln). Es wird artikelbezogen kommissioniert und die Aufträge umfassen eine kleine Anzahl an Positionen (1 bis 5). Die Ablage erfolgt in einen Sammelbehälter, der über Fördertechnik abtransportiert wird. Aufgrund der kaum vorhandenen Wege³⁷ und der

³⁷ Die Fortbewegung wird als eindimensional ohne Gangwechsel definiert, da sich der Kommissionierer meist entlang der drei Regale bewegt.

kleinvolumigen Artikel sind hohe Kommissionierleistungen bis zu 1.000 Picks/h möglich [Jün-00].

Dies stellt hohe Anforderungen an das Pick-by-Vision-System hinsichtlich der Leistung. Im Prinzip sind in diesem Fall die gleichen Aspekte aufzuführen wie bei Szenario 2. Der vom Trackingsystem abdeckbare Bereich ist durch das Kommissioniernest definiert und umfasst ca. 3 x 3 m. Nicht nur die Anforderungen an die Kommissionierleistung ist höher, sondern auch an die Genauigkeit des Trackingsystems, denn aufgrund der kleinen Artikel sind auch die Fächer in den Regalen sehr klein.

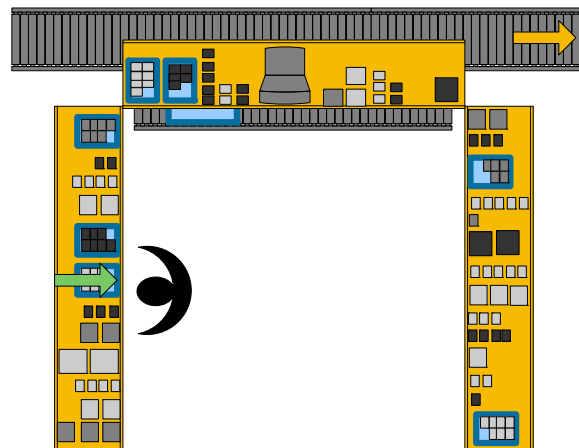


Abbildung 4-7: Kommissioniernest

4.2.3.4 Szenario 4: Stationärer Kommissionierarbeitsplatz

Die Bereitstelleinheiten (Behälter) werden über Fördertechnik aus dem Lagerbereich zum Kommissionierer transportiert (siehe Abbildung 4-8). Aufgrund der Anordnung der zuführenden Fördertechnik wird dieser stationäre Arbeitsplatz in einer Hochregalvorzone Kommissionier-U genannt [ten-07]. Der Kommissionierer entnimmt die Artikel und legt sie in eine Sammeleinheit. Da ihm auch mehrere Entnahmebehälter gleichzeitig zur Verfügung gestellt werden können, handelt es sich um eine freie Lagerplatzanordnung, bei der ein oder auch mehrere Artikel im Zugriff sind. Bei diesem stationären Kommissionierarbeitsplatz fallen keine Wege an. Es werden Kleinteile aus einem großen, heterogenen Sortiment (15.000 Artikel) von Schnell- und Langsamdrehern gehandhabt. Die Kommissionierung erfolgt auftragsorientiert mit einer mittleren bis hohen Anzahl von Positionen pro Auftrag (3-15 Positionen). Die parallele Bearbeitung mehrerer Aufträge ist notwendig, weil die Bereitstelleinheit somit nicht so oft aus dem Lagerbereich transportiert werden muss und die Durchsatzanforde-

rungen an die Fördertechnik niedriger sind. Der Kommissionierer entnimmt ggf. mehrere Artikel und verteilt sie auf mehrere Sammelbehälter. Herkömmlich lesen die Kommissionierer die Daten von stationären Terminals ab und werden ggf. durch visuelle Hilfen unterstützt, z. B. Put-to-Light oder Projektionen auf den Entnahmebehälter.

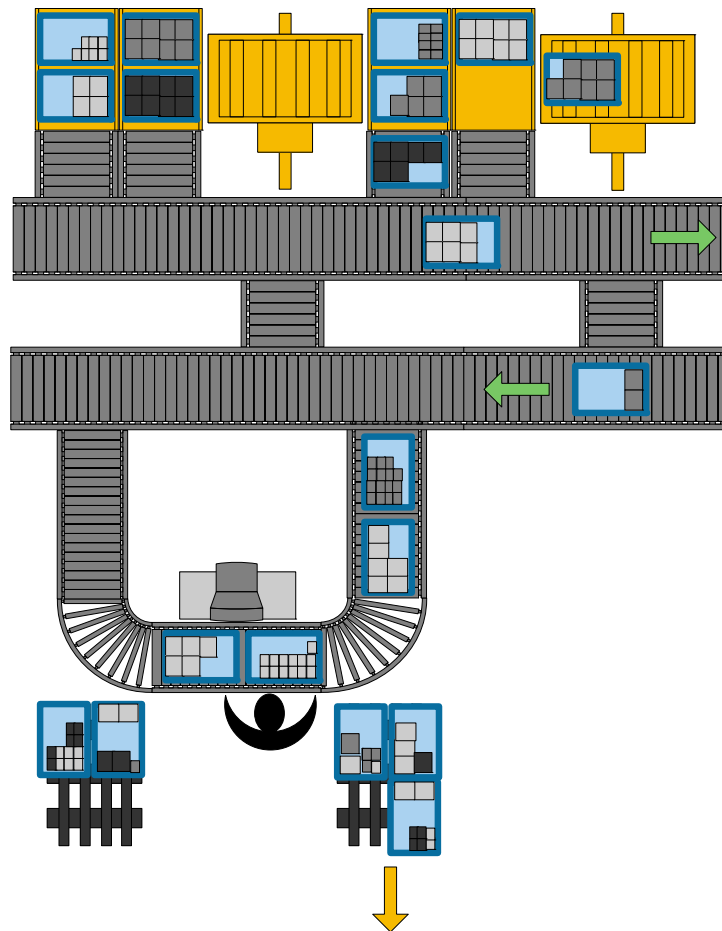


Abbildung 4-8: Stationärerer Kommissionierarbeitsplatz

WzM-Systeme erbringen den höchsten Durchsatz, weil keine Wege zurückzulegen sind. Die physische Tätigkeit des Kommissionierers besteht nur noch aus Greifen und Ablegen. Deshalb ist eine ergonomische Gestaltung des Kommissionierarbeitsplatzes als Schnittstelle zwischen Mensch und Technik in diesem Fall sehr wichtig. Durch den Einsatz einer Datenbrille können Kopf- und Körperbewegungen reduziert werden, weil die Information direkt vor dem Auge ist und der Blick zum Monitor entfällt. Die Wegfindung bietet kein Potenzial, aber es können sowohl der Entnahme- als auch der Ablageort optisch hervorgehoben werden. Vorteilhaft ist auch der kleine Messraum für das Trackingsystem (ca. 3 x 3 m). Pick-by-Vision muss dieselben ho-

hen Anforderungen an die Ergonomie und den Durchsatz erbringen wie herkömmliche Systeme.

5 Anforderungen an ein AR-Kommissioniersystem

Die Entwicklung eines AR-basiertes Kommissioniersystems wird von vielen Faktoren beeinflusst: der Aufgabe, dem Kommissionieren, von den verfügbaren Hard- und Softwarekomponenten und ganz entscheidend vom Anwender. In diesem Kapitel werden die Anforderungen dieser Faktoren an Pick-by-Vision zusammengefasst.

5.1 Kommissionierung

Als erstes wird die Aufgabe betrachtet, die mit dem Einsatz eines AR-Systems bewerkstelligt werden soll. Die Kommissionierung ist ein Prozess, dessen Gestaltung sehr von den Randbedingungen im jeweiligen Anwendungsfall abhängt. Deshalb ist es schwierig allgemeingültige Anforderungen an Pick-by-Vision hinsichtlich des Kommissionierprozesses aufzustellen (siehe Tabelle 5-1).

Anforderungen aufgrund des Kommissionierprozesses		
statische Daten	dynamische Daten	Sonstiges
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lagerort ▪ Artikelnummer ▪ Entnahmemenge (inkl. Einheit) ▪ Login/Logout ▪ Sammelbehälter ▪ (Artikelbezeichnung) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wegfindung ▪ Entnahmeort ▪ Ablageort 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eingabe von Fehlmengen ▪ Online-Anbindung an WMS (ggf. mehrerer Clients) ▪ parallele Bearbeitung mehrerer Aufträge ▪ Prozess: Login, Auftragsauswahl, Sammelbehälter aufnehmen, Auftrag, Auftragsabgabe ▪ Konfigurierbarkeit der angezeigten Datenmenge

Tabelle 5-1: Anforderungen aus Sicht des Kommissionierprozesses

Eine generelle Anforderung an moderne Kommissioniersysteme ist, dass sie flexibel an unterschiedliche und stets neue Sortiments- und Auftragsstrukturen anpassbar sein müssen, wodurch sich die Durchlaufzeit aber nicht verkürzen darf [Con-03]. Deshalb soll sich Pick-by-Vision nicht auf spezielle Artikel beschränken (Größe, Form, Verpackung, EE/h etc.), sondern einen breiten Einsatzbereich vorweisen. Neben der Artikelstruktur soll es auch eine Unabhängigkeit von der Auftragsstruktur und vom mengenmäßigen Umschlag im Lager aufweisen. Pick-by-Vision soll keine Nischenlösung sein, sondern ein breites Spektrum an Einsatzfeldern in der Kommissionierung abdecken. Die in Kapitel 4.2.3 ausgearbeiteten Szenarien gelten dafür als

Beispiele, die im Rahmen unternehmensspezifischer Randbedingungen variiert werden können. Es kann sowohl in Schnellläufer- als auch im Langsamläuferbereich eingesetzt werden, wobei das Artikelspektrum von kleinen Schachteln bis zu schweren Gütern reichen kann.

Pick-by-Vision ist eine papierlose Informationsbereitstellungstechnologie. Damit die Daten zwischen dem Kommissionierer und dem WMS ständig aktuell sind, soll ein online-Datenaustausch stattfinden. Das WMS übernimmt die Erstellung des Kommissionierauftrags unter Berücksichtigung aller Randbedingungen (Kommissionierstrategien, Batchbildung, Auslastung, Wegoptimierung etc.). Da das Potenzial zur Hervorhebung des Ablageplatzes genutzt werden soll, ist eine parallele Bearbeitung mehrerer Aufträge in einem Kommissionierbereich vorzusehen. In der Praxis arbeiten mehrere Kommissionierer gleichzeitig mit dem Pick-by-Vision-System, so dass eine Systemarchitektur verwendet werden soll, die es ermöglicht, mit mehreren Clients gleichzeitig zu arbeiten. Um mit verschiedenen Benutzern umgehen zu können, ist ein Login bzw. ein Logout zu integrieren, damit jeder abgearbeitete Auftrag einem Kommissionierer zugeordnet werden kann.

Weiterhin gilt es festzulegen, welche Daten dem Kommissionierer zur Verfügung gestellt werden müssen. Ein Kommissionierauftrag enthält allgemeine Informationen (z. B. Auftragsnummer, Auftragsart, Kunde etc.) und Positionsinformationen [Men-99]. Die Informationen zu jeder Auftragsposition sind für die operative Ausführung des Kommissionierauftrags notwendig. Für die Kommissionierung können viele Informationen wichtig sein, es sind aber nur wenige unverzichtbar. Dies sind die Artikelnummer, der Entnahmeort und die Entnahmemenge (Greifeinheiten) mit Bezeichnung der Verpackungseinheit (Stück, Packung, Karton etc.). Es können weitere Textinformationen, z. B. die Charge aus Gründen der Rückverfolgbarkeit, oder auch Bilder notwendig sein. Eine wichtige Aufgabe des Kommissionierers sind Bestandskorrekturen, falls der tatsächliche Bestand im Lager vom Buchungsbestand abweicht, so dass das Nachholen bzw. Vervollständigen von Positionen nötig ist, wenn nicht genügend Teile am Entnahmeort liegen. Kommissionierer übernehmen oft weitere Tätigkeiten wie Etikettieren, Verpacken, den Nachschub oder das Leerbehältermanagement. Kommissioniersysteme in der Praxis sollten auch Ausnahmesituationen wie Mindermengenverwaltung, Überspringen von Plätzen, Mehrmengenentnahme oder Ladungsträgerwechsel abdecken [Hil-04]. Jedes Unternehmen hat seine eigenen

Anforderungen, welche Daten dem Kommissionierer zur Verfügung stehen sollen. Da nicht auf unternehmensspezifische Besonderheiten eingegangen wird und in dieser Arbeit die Entwicklung eines Pick-by-Vision-Systems im Vordergrund steht, werden nur die essentiellen Daten Artikelnummer, -beschreibung, Entnahmeort, Entnahmemenge und Artikelbild, sowie die Artikelablage und die Eingabe von Mengenfehlern weiter betrachtet. Die Artikelnummer ist zur eindeutigen Identifizierung des Artikels notwendig, der Entnahmeort und die Menge sind für die Ausführung des Kommissionierauftrags unerlässlich. Die Artikelbeschreibung und das Bild stellen zusätzliche Hilfen v. a. bei einem sehr homogenen Artikelspektrum dar. Kommissionierfehler sind zu vermeiden bzw. sind Unstimmigkeiten zu erkennen und zu melden, so dass ein Fehlermanagement möglich sein muss. AR-spezifische Möglichkeiten sind die optische Hervorhebung des Weges, des Entnahme- und Ablageortes. Es soll ein einfacher Kommissionierprozess umgesetzt werden, der aus der Aufnahme des Sammelbehälters, dem Kommissionierauftrag und der Abgabe des Sammelbehälters besteht. Bei der parallelen Bearbeitung mehrerer Aufträge müssen mehrere Sammelbehälter und Aufträge gleichzeitig bearbeitet werden.

Ein weiterer Punkt ist die Anzahl der angezeigten Positionen. Bei der Montage mit AR-Unterstützung wird beispielsweise nur Arbeitsschritt für Arbeitsschritt angezeigt [Wie-04]. Bei einer papierbehafteten Anleitung können gleich mehrere Schritte aus einer Abbildung ersichtlich sein, auf die sich der Monteur vorab einstellen kann. Bei der Kommissionierung gibt das WMS den Auftrag wegoptimiert vor, so dass es ausreichend ist, wenn nur die nächste Position angezeigt wird. Viele Kommissionierer wollen einen Überblick über den gesamten Auftrag haben, um sich besser darauf einstellen zu können und ggf. aufgrund ihrer Erfahrung oder bestimmter Begebenheiten noch Änderungen vornehmen zu können. Der Kommissionierer soll die anzuzeigende Datenmenge im Rahmen der Kommissionieraufgabe individuell an seine Bedürfnisse anpassen können. Beispielsweise kann er zwischen der Anzeige der nächsten Position oder der ganzen Liste entscheiden. Erfahrene Kommissionierer benötigen nur die minimal erforderliche Menge an Daten, während unerfahrene oder Leiharbeiter zu Beginn noch mehr benötigen. Hierfür ist ebenso eine Anpassungsmöglichkeit vorzusehen.

5.2 Hardware

Die Hardware am Kommissionierer besteht aus einer Datenbrille, einem Interaktionsgerät und einem mobilen Rechner. Das Trackingsystem teilt sich auf den Anwender und stationäre Komponenten auf, während ein Server, u. a. für das WMS, ortsfest installiert ist. Da Pick-by-Vision im industriellen Umfeld eingesetzt wird, darf die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter nicht gefährdet werden, z. B. dürfen keine Kabel abstehen, die sich irgendwo verhaken können. Die Hardware soll sowohl zu keiner erhöhten Unfallgefahr führen als auch die Bewegungsfreiheit nicht einschränken. Die Geräte müssen möglichst robust gebaut sein, um z. B. Stürze aus Hüfthöhe zu überstehen, oder gegenüber elektromagnetischer Strahlung unempfindlich sein. Kosten bleiben in dieser Arbeit weitestgehend unberücksichtigt, weil am Markt befindliche AR-Komponenten meist nur als Prototypen oder Kleinserien verfügbar sind.

5.2.1 Mobiler Rechner

Der Kommissionierer führt den mobilen PC den ganzen Tag mit sich. Der Rechner muss damit möglichst nahe am Körperschwerpunkt getragen werden, um das Gleichgewichtsempfinden des Nutzers nicht negativ zu beeinflussen [Sas-08]. Wenn möglich, gilt es den Rechner inklusive aller Kabel in die Arbeitskleidung zu integrieren (Wearable Computing). Für AR ist eine hohe Rechenleistung gefordert (Auswertung Tracking, Generierung Grafik, Echtzeitfähigkeit). Um die Rechenleistung und somit die Größe und das Gewicht des mobilen Rechners möglichst niedrig zu halten, soll auf ein verteiltes System zurückgegriffen und rechenintensive Aufgaben von den stationären Rechnern erledigt werden. Die Kommunikation zwischen ggf. mehreren mobilen und stationären Rechnern erfolgt über ein drahtloses Netzwerk. Nicht nur das Gewicht soll für einen Schichteinsatz über acht Stunden ausgelegt sein, sondern auch der Akkubetrieb. Ein Aufladen ist während der Pausen möglich.

5.2.2 Datenbrille

Die Akzeptanz von HMDs ist umstritten. HMDs entsprechen hinsichtlich Größe, Gewicht und FoVD noch nicht den Anforderungen eines industriellen Umfelds [Küc-03]. Der Absatzmarkt ist immer noch nicht groß genug und die Trageeigenschaften, das Aussehen und die „Frisurenfreundlichkeit“ der Systemträger stellen Akzeptanzprob-

leme dar, wobei dies individuell vom Einsatzfall abhängt. Im industriellen Bereich ist im Gegensatz zum Konsumenten das Design nicht so problematisch, weil die Displays am Helm befestigt werden können [Rüg-02], spielt aber für die Akzeptanz eine gewisse Rolle. Der Mitarbeiter soll sich nicht exponiert mit der zu tragenden Hardware vorkommen [Miz-01]. Dazu sind eine hohe Robustheit und ein Tragekomfort über einen ganzen Arbeitstag gefordert. Untersuchung in der Praxis zeigten, dass alle Probanden mit dem HMD mindestens 30 min pro Tag arbeiten würden, aber keiner es sich für den Ganztageinsatz vorstellen kann [Oeh-04]. Dies zeigt das grundsätzliche Interesse, aber auch noch die vorhandene Skepsis bei längerem Einsatz. Neben den langfristigen Wahrnehmungseffekten (binokulare Rivalität, Phorie etc.) sind noch weitere offene Fragen zu klären [Lar-02]:

- Inwieweit können sich Benutzer an die Effekte gewöhnen?
- Kann der Benutzer lernen, mit diesen Effekten umzugehen?
- Können die Effekte durch automatisches Anpassen der Helligkeit der virtuellen Objekte in Abhängigkeit der Entfernung abgeschwächt werden?
- Können eine Vergrößerung des FoVD und eine höhere Auflösung zu einer höheren Akzeptanz führen?

Die Entwicklung von Datenbrillen verlief in der Vergangenheit meist sehr technozentriert, um die verschiedenen Zielkonflikte zu lösen. Für ein großes FoVD mit einer großen Austrittspupille sind Abstriche bei der Auflösung zu machen und das HMD wird schwerer. Der Tragekomfort verschlechtert sich. Ein großes FoVD mit möglichst kleinem Verdeckungsgebiet (großes FoVE) benötigt eine stark vergrößernde Optik. Der Winkel, unter dem Bildelemente wahrgenommen werden, steigt, was im Widerspruch zu einer möglichst großen Auflösung steht [Alt-03]. Eine hohe optische Qualität erfordert viele optische Elemente, wodurch die Größe und das Gewicht zunehmen. Bei der Verwendung von Microdisplays mit hohen Auflösungen wird eine bessere Bildqualität erreicht, aber sie benötigen viel Bauraum. Monokulare Geräte sind leicht, besitzen aber eine ungünstige Schwerpunktlage.

Grundsätzlich sollten HMDs für jede Anwendung maßgeschneidert werden [Cak-06]. Folgende Kriterien werden für die Bewertung von Datenbrillen für den Einsatz in der Kommissionierung herangezogen: Bauart und Okularität, FoV, Auflösung, Bildwiederholfrequenz, Bildqualität, Chromatik und Ergonomie.

Bauart und Okularität

Datenbrillen mit Look-Through-VST sind vom Einsatz in industriellen Umgebungen ausgeschlossen. Der Arbeitsschutz ist nicht gegeben, denn bei einem Stromausfall ist der Benutzer blind und aufgrund der Latenzzeit kann es zu Cyber Sickness kommen. Darüber hinaus wird die Realität nur in einer geringen Auflösung angezeigt [Oeh-04]. Durch das geringe FoVD und FoVE entsteht ein Tunnelblick, der zur Desorientierung führen kann [Wie-04]. OST sind den VST vorzuziehen [Fri-04]. Allerdings ist eine schwierige Kalibrierung zwischen Display, Trackingsystem und optischem System des Benutzers (= Auge) nötig, die bereits bei einem geringen Verrutschen des HMD wiederholt werden muss, um eine falsche räumliche Einbindung der virtuellen Objekte im 3D-Raum zu vermeiden. Das periphere Sehen ist wichtig für sichere und effiziente Mobilität. Binokulare OST HMDs haben einen größeren Einfluss hierauf als monokulare Look-Around HMDs, weil sie Teile des monokularen und binokularen FoVE verdecken, während die monokularen nur eine minimale Verdeckung verursachen (vorausgesetzt beide Augen sind offen) [Woo-03]. Generell besteht bei Datenbrillen ein erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung, so dass es keine endgültige Entscheidung in diesem Punkt gibt. Aber es zeigt sich, dass sich binokulare HMDs für den Produktionseinsatz schlechter eignen als monokulare [Oeh-04]. Für den industriellen Einsatz wie bei der Kommissionierung, der über einen längeren zusammenhängenden Zeitabschnitt erfolgt, eine gewissen Mobilität erfordert und in sicherheitskritischer Umgebung stattfindet, eignen sich nur kleine monokulare OST- oder Look-Around-Displays ([Alt-03], [FrL-06], ([Gün-09], [Oeh-04], [Rüg-02], [Wie-04]). Monokulare HMDs werden bevorzugt, wenn mit der realen Welt interagiert werden soll, während auf das Display geschaut wird [Lar-02]. Dies liegt daran, dass sie den ergonomischen Anforderungen eher genügen, auch wenn die Möglichkeiten der Visualisierung eingeschränkt sind.

Field of View

Beim FoV sind die beiden unterschiedlichen Ausprägungen FoVD und FoVE zu beachten. Für die Kommissionierung wird ein monokulares HMD bevorzugt eingesetzt, so dass ein wünschenswertes FoVD, das in der Nähe des menschlichen Blickfeldes ist, nicht zu erreichen ist. Dies ist in der Kommissionierung nicht unbedingt nötig, denn im einfachsten Fall werden die Auftragsdaten als statischer Text angezeigt. Dafür ist ein FoVD von 30° horizontal und 20° vertikal ausreichend. Meistens wird das

digitale FoVD angegeben, so dass dies ca. 35° betragen soll. Für die Visualisierung von dynamischen 3D-Daten im Raum, wie dem Hervorheben des Lagerfachs, ist ein großes FoVD von Vorteil. Bei einem kleinen FoVD sind entsprechende Blickführungsmetaphern in der Visualisierung vorzusehen. Dem kleinen FoVD steht ein großes FoVE gegenüber. Dies ist für den industriellen Einsatzfall viel wichtiger, denn die Sicht des Werkers darf aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen (Vermeidung von Unfällen) nicht eingeschränkt werden. Auch monokulare Look-Around HMD mit einem kleinen Monitor vor dem Auge verdecken schon soviel vom Blickfeld, dass ihr Einsatz im Umfeld mit Staplerbetrieb ausgeschlossen wird [Bra-05].

Auflösung

Die beiden Kriterien FoVD und Auflösung bilden einen derzeit kaum zu überwindenden Zielkonflikt. Je größer das FoVD bei gleich bleibender Auflösung, desto kleiner wird die Anzahl der Pixel pro Grad u. u. [Mel-97]. Die Auflösung hängt auch von der Bauart und der Bildquelle ab. Vor allem bei VST, wenn auch die Realität mit einer bestimmten Auflösung dargestellt wird, ist eine hohe Auflösung wünschenswert. Bei OST-Systemen nimmt der Benutzer die Realität in der realen Auflösung wahr und nur bei kongruenter Überlagerung muss die Auflösung gleich der Auflösung des realen Objekts sein [Alt-03]. Bei heutigen HMD liegt der Sehwinkel oft bei zwei Bogenminuten und jeder einzelne Bildpunkt ist sichtbar [Oeh-04]. Wenn ein FoVD von 30° horizontal und 20° vertikal erreicht werden soll und für den Menschen die einzelnen Bildpunkte nicht mehr unterscheidbar sein sollen (ein Punkt für eine Bogenminute), ist eine Auflösung von 1.800 x 1.200 Pixel nötig. Die Auflösung liegt allerdings meistens bei 1.024 x 768 Pixel (XGA³⁸) oder sogar noch niedriger, so dass ein großes FoVD (größer 50°) kaum mit einer ansprechenden Auflösung realisiert werden kann [Pat-04]. Für einen besseren Vergleich soll die Auflösung auf das FoVD bezogen werden, so dass mindestens eine Auflösung von einer Bogenminute pro Bildpunkt erforderlich ist.

Bildwiederholfrequenz

Ab einer Bildwiederholfrequenz von 70 bis 80 Hz ist das Bild für den Menschen flimmerfrei [Oeh-04]. 70 Hz sind für eine Auflösung von 1.024 x 768 nötig. VRD errei-

³⁸ XGA: Extended Graphics Array

chen aufgrund der Mechanik nur 60 Hz, die als Mindestanforderung für diese Anwendung festgelegt wird. Die höchste Bildwiederholfrequenz ist nichts wert, wenn die Latenzzeit des Gesamtsystems zu hoch ist.

Bildqualität

Die Umweltbedingungen können im industriellen Umfang schwanken, deshalb soll sich der Kontrast des Displays daran anpassen lassen bzw. sich automatisch daran anpassen. Die Beleuchtungsstärke an Arbeitsplätzen soll an den höheren Lichtbedarf älterer Arbeitnehmer angepasst werden [VDI3657]. Sie sollte für normale Sehaufgaben zwischen 500 und 750 lx betragen und relativ konstant sein. Allerdings kann es in der Kommissionierung deutliche Unterschiede geben, beispielsweise zwischen einer hellen Lagervorzone und einer dunkleren Gasse.

Chromatik

Eine Farbdarstellung ist im Produktionsumfeld völlig unwichtig [Oeh-04]. Bei Pick-by-Vision werden statische Testdaten und 3D-Geometrien im Raum, die bestimmte Orte hervorheben, angezeigt. Dafür ist keine farbliche Darstellung nötig. Eine monochrome Darstellung reduziert die Komplexität des HMD und führt zu einer kompakteren und kleineren Bauweise. Bei der Anzeige von Artikelbildern und ggf. einer Hervorhebung von darin enthaltenden markanten Merkmalen ist eine Farbdarstellung vorteilhaft.

Ergonomie

Die Ergonomie ist einer der wichtigsten Punkte für die Benutzerakzeptanz. Der Benutzer soll die Möglichkeit haben, das HMD auszuschalten bzw. wegzuklappen, wenn er die virtuellen Informationen nicht braucht [Oeh-04]. Außerdem soll es an weitere individuelle Faktoren anpassbar sein (Brillen, Kopfform, Schwerpunktlage nahe Kopfzentrum, gleichmäßige Gewichtsverteilung auf Nase und Ohren). HMDs mit 70 bis 80 g und Dreipunktauflage (Brille) führen zu erheblichen Beschwerden [Ede-05]. Bei der Kommissionierung ist darauf zu achten, dass sich der Benutzer mit dem HMD oft bücken bzw. den Kopf neigen muss, wodurch eine unvorteilhafte Gewichtsverteilung entsteht (siehe Abbildung 5-1). Generell ist ein niedriges Gewicht eine Grundvoraussetzung für einen Einsatz über einen gesamten Arbeitstag, um gesundheitlichen Folgen vorzubeugen. Mit einem Systemträger, der mehrere größere Auflageflächen besitzt, kann ein HMD bis 200 g bequem getragen werden [Rot-04].

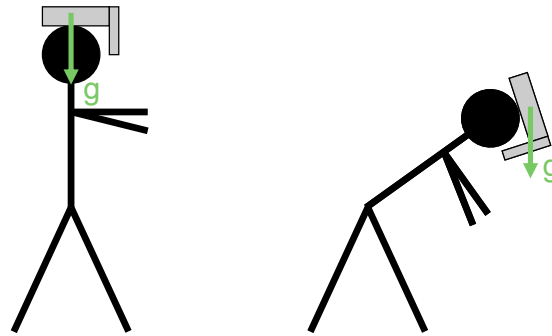


Abbildung 5-1: Schwerpunktlage im Stehen und beim Bücken

Tabelle 5-2 fasst die Anforderungen an die Datenbrille aus Sicht der Entwicklung eines AR-gestützten Kommissioniersystems zusammen.

Anforderungen an die Datenbrille	
Visualisierung	Ergonomie
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauart: monokular (Look-Around, OST) ▪ FoVD: 30° horizontal, 20° vertical (35° diagonal) ▪ Auflösung: mind. 1'/Pixel (= 0,017°/Pixel) ▪ Bildwiederholfrequenz mind. 60 Hz ▪ monochrom 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wegklappen oder ausschalten des Displays ▪ Benutzung mit Brille ▪ individuell einstellbarer Systemträger ▪ identischer Kopf- und HMD-Schwerpunkt ▪ Gewicht bis 200 g (in Abhängigkeit der Auflagefläche)

Tabelle 5-2: Anforderungen an die Datenbrille

5.2.3 Trackingsystem

Das Trackingsystem muss jeweils an den entsprechenden Anwendungsfall angepasst werden. Alle Trackingverfahren haben grundlegende Nachteile, so dass meist ein Trackingverfahren nicht ausreichend ist. Es soll daher der Einsatz von verschiedenen Trackingverfahren (gleichzeitig) möglich sein, die einfach in das Gesamtsystem integriert werden können. Beispielsweise kann ein Verfahren die grobe Position übernehmen, ein anderes die feine Position und die Orientierung. Dazu ist es nötig, dass die Daten der verschiedenen Systeme fusionieren können.

Genauigkeit

Die Genauigkeitsanforderungen hängen von der Aufgabe ab [Rob-04]. Bei der Kommissionierung müssen zwei Fälle unterschieden werden. Bei der Wegfindung ist es ausreichend, wenn die Position des Kommissionierers so genau bestimmt wird, dass es eindeutig ist, in welcher Gasse er sich befindet. Beim Entnahme- und Ablagevorgang wird die Genauigkeit von der Lagerfachgröße bzw. der Größe des Sammelbe-

hälters bestimmt. Das System muss so genau sein, dass der Kommissionierer den Lagerplatz ohne Probleme sofort erkennen kann. Bei den Einsatzszenarien wird von Palette, aus Regalen und aus Behältern kommissioniert und in Sammelbehälter abgelegt. Paletten haben eine Größe von 1.200 x 800 mm, klassische Behälter bei WzM von 600 x 400 mm und die Lagerfächer in Durchlauf- oder Fachbodenregalen von ca. 300 x 400 mm. Die Größe von Sammelbehältern bewegt sich ebenfalls in diesem Bereich. Für die Visualisierung ist nicht die Tiefe, sondern eher die Höhe des Lagerfachs interessant, die sich meist zwischen 300 und 500 mm bewegt. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Entfernung zwischen Auge und Lagerfach. Im Nahbereich, d. h. bei der Entnahme, beträgt diese ca. 500 mm (Armlänge beim Greifen). Ist die Genauigkeit bei der Darstellung am HMD bei 1 mm (Abstand Auge zu HMD 50 mm), ist der Winkelfehler bei einer Entfernung von 500 mm schon bei 10 mm. Die angezeigte 3D-Geometrie stellt weitere Anforderungen an die Genauigkeit. Ohne die Visualisierung näher zu betrachten, ist eine Genauigkeit von +/- 2 mm und 0,5' erforderlich (siehe Abbildung 5-2).

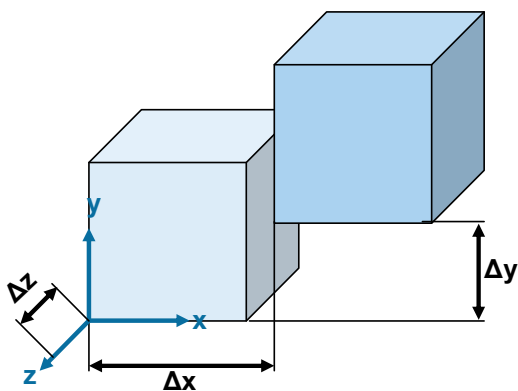


Abbildung 5-2: Statischer Fehler (Genauigkeit)

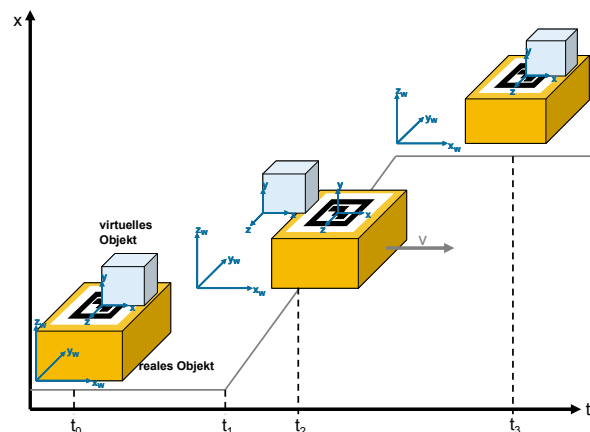


Abbildung 5-3: Dynamischer Fehler (Latenzzeit)

Latenzzeit

Das System soll in Echtzeit arbeiten, d. h. dass auch schnelle Kopfbewegungen des Menschen abgefangen werden müssen. Eine typische Kopfbewegung mit $60^\circ/\text{s}$ bei einer Latenzzeit von 100 ms entspricht einem winkelbezogenen Fehler von 6° . Daraus resultiert ein translatorischer Fehler in einer typischen virtuellen Objektweite von 500 mm von ca. 52 mm. Die gesamte Latenzzeit des Systems (inkl. Bildaufbereitung und Ausgabe) sollte 70 ms nicht überschreiten [Rol-01b]. Somit muss die Latenzzeit des Trackingsystems niedriger sein (siehe Abbildung 5-3). Die Updaterate für das

Trackingsystem sollte für eine ruckfreie Darstellung der virtuellen Daten bei mindestens 50 Hz liegen.

Freiheitsgrade

Hinsichtlich der DoF müssen zwei Fälle unterschieden werden. Wird nur die Position des Kommissionierers erfasst, sind zwei DoF ausreichend. Für die optische Hervorhebung eines Lagerfachs werden allerdings die Blickrichtung des Benutzers und somit sechs DoF benötigt. Dies ist die Anforderung an das gesamte Trackingsystem.

Robustheit

Das Trackingsystem soll robust gegenüber allen Umwelteinflüssen im Lager sein (z. B. Lichtverhältnisse, Verschmutzung, hoher Metallanteil). Das Tracking von Staplern wird bereits in rauen Umgebungen durchgeführt, allerdings nicht mit sechs DoF und in der geforderten Genauigkeit [Bar-08]. Die meisten Trackingverfahren für AR wurden im Laborumfeld entwickelt. Es ist zu prüfen, wie sich die Verfahren für eine Lagerumgebung eignen. In industriellen Umgebungen wird mit Hilfsmitteln generell nicht vorsichtig umgegangen.

Messraum

Bei der konventionellen Kommissionierung ist der gängige Anwendungsfall, dass sich ein mobiler Kommissionierer zu einem ortsfesten Lagerplatz bewegt. Drei der ausgewählten Einsatzszenarien beziehen sich auf diesen Anwendungsfall, beim vierten Szenario handelt es sich um einen stationären Arbeitsplatz. Im Messraum unterscheiden sich die vier Szenarien, während die anderen Anforderungen für alle vier gelten. Deshalb sollte das ausgewählte Trackingsystem skalierbar hinsichtlich des Messraums sein. Je mehr Sensoren im Raum, desto robuster ist im Idealfall das Tracking. Dies erhöht ebenso die Kosten wie die Abdeckung eines großen Bereichs mit vielen Sensoren.

Tabelle 5-3 zeigt die wesentlichen Anforderungen an das Trackingsystem aus Sicht der AR-Kommissionierung auf.

Anforderungen an das Trackingsystem
<ul style="list-style-type: none">▪ Genauigkeit: 2 mm und 0,5'▪ Updaterate: 50 Hz▪ DoF: sechs (Gesamtsystem)▪ Robustheit gegenüber Einflüssen im Lager (z. B. Lichtverhältnisse, Verschmutzung, hoher Metallanteil)▪ Messraum: abhängig von Einsatzszenario, skalierbar

Tabelle 5-3: Anforderungen an das Trackingsystem

5.2.4 Interaktionsgerät

Das Interaktionsgerät muss die für die vier ausgewählten Einsatzszenarien benötigten Interaktionen umsetzen können und bestimmte Anforderungen aus dem Lagerbetrieb erfüllen.

Benötigte Interaktionen

Zunächst muss geklärt werden, welche Interaktion durchgeführt werden müssen. Eine direkte Interaktion mit virtuellen Modellen ist nicht nötig. Es werden nur Systemeingaben berücksichtigt, die durch den einfachen Kommissionierprozess aus Kapitel 5.1 führen. Die wichtigste Systemeingabe ist die Quittierung jeder Position. Diese Interaktion ist die gleiche wie für jede andere nötige Bestätigung (Auftragsannahme, Auftragsabgabe). Der Kommissionierer muss die Möglichkeit haben, Fehlmengen einzugeben. Dafür ist der Aufruf eines Menüs notwendig. Weitere wichtige Funktionen sind das Aus- und Einschalten des Displays und ein Befehl, den letzten Schritt rückgängig machen zu können. Menüs können auch bei der Auftragsauswahl und für die Systemeinstellungen benutzt werden. Neben einem Menüaufruf ist die Navigation durch einfache 1D-Menüs notwendig. Die Auswahl eines Menüpunkts erfolgt mit der Bestätigung. Bei der Meldung der Fehler sowie beim Login kann die Eingabe von alphanumerischen Zeichen notwendig sein.

Anforderungen aus dem Lagerbetrieb

Das Interaktionsgerät muss sich bis auf das Einsatzszenario des stationären Arbeitsplatzes am Kommissionierer befinden. Diese Mobilität schließt die Verwendung von herkömmlichen Desktopeingabegeräte oder Geräte aus VR-Umgebungen mit gerin-

ger Reichweite aus. Die Interaktionstechnik ist so zu wählen, dass der Kommissionierer (meistens) beide Hände für die Kommissionierung zur Verfügung hat und es in der Bewegung bedienen kann. Das Gerät soll sich leicht, schnell und intuitiv bedienen lassen, um die Akzeptanz zu erhöhen und eine kurze Einlernphase zu ermöglichen. Für eine hohe Akzeptanz ist auch wichtig, dass das Gerät ohne Probleme in die Arbeitskleidung bzw. die anderen Hardwarekomponenten integriert werden kann. Da in Lagerumgebungen keine feinmotorischen Fähigkeiten zu erwarten sind, muss es auch mit Handschuhen ohne Probleme bedient werden können, resistent gegen Schmutz sein und Stürze aus 1,5 m ohne Probleme überstehen. Tabelle 5-4 fasst die Anforderungen sowie die benötigten Interaktionen zusammen.

Anforderungen an das Interaktionsgerät	
benötigte Interaktionen	Lagerbetrieb
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestätigung (Quittierung einer Position) ▪ Aufruf Fehlermenü ▪ Display ausschalten ▪ letzten Schritt rückgängig machen ▪ Navigation durch 1D-Menüs (Scrollen) ▪ alphanumerische Zeichen (Login, Fehlereingabe) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mobilität ▪ Hände frei ▪ Bedienung in der Bewegung ▪ Bedienung mit Handschuhen ▪ Gewicht bis 100 g ▪ Integration in andere Hardwarekomponenten

Tabelle 5-4: Anforderungen an das Interaktionsgerät

5.3 Software

Pick-by-Vision ist in erster Linie eine Informationsbereitstellungstechnologie für die Kommissionierung, so dass ein Hauptaugenmerk auf die Visualisierung der benötigten Daten sowie die Interaktion gelegt wird. Die Auftragsdaten werden vom WMS kontextbezogen erstellt, so dass eine Kopplung an das WMS nötig ist. Die WMS-Anbindung erfolgt über WLAN unter Einbezug von standardisierten Schnittstellen wie z. B. Protokolle auf Basis von XML³⁹, um eine Integration in die bestehende IT-Infrastruktur zu erleichtern. Da das WLAN-Netz im Lagerbereich sehr inhomogen ist [Iba-05], kann es durchaus zu Störungen und sogar Unterbrechungen des Funkverkehrs kommen, so dass ein Zwischenspeichern der Auftragsdaten und auch der vom

³⁹ XML (Extensible Markup Language): Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Form von Textdaten

Kommissionierer eingegebenen Daten am mobilen Rechner vorzusehen ist. Die WMS-Anbindung ist kein Kernpunkt dieser Arbeit und wird nicht näher betrachtet.

5.3.1 Visualisierung

Es sollen statische Daten, wie Text und Bilder, sowie dynamische 3D-Geometrien dargestellt werden. Eine kongruente Überlagerung, d. h. dass ein virtuelles Objekt deckungsgleich mit einem realen Objekt überlagert wird, ist nicht vorgesehen. Neben Textelementen soll der Kommissionierer auch grafisch unterstützt werden, weil Piktogramme oft mehr als Worte sagen. Da die Visualisierung sehr stark vom verwendeten HMD abhängt, wird hier nur auf grundlegende Punkte eingegangen.

Für ein ermüdungsfreies und schnelles Lesen müssen eine Zeichengröße von mindestens 17 Pixeln und eine strukturierte Darstellung (Zeilenabstand, Anordnung der Zeichen etc.) gegeben sein. Die Informationsdichte sollte sich an die 7 +/- 2 psychologische Einheiten der Informationsaufnahme als Maximum des Menschen anlehnen. Bei AR ist eine Überladung des FoVD mit Informationen zu vermeiden, weil dadurch nicht nur das Finden der relevanten Informationen schwieriger, sondern auch die Sicht auf die Realität verdeckt wird. So können dem Kommissionierer die Informationen nach und nach bereitgestellt werden, d. h. zunächst die Weginformation und dann die Pickinformation, wenn er in der Nähe des Lagerfachs ist. Eine mögliche Individualisierung ist vorzusehen, so dass es sich der Kommissionierer aussuchen kann, welche Daten er sich anzeigen lassen will und wie, z. B. über ein benutzerabhängiges bzw. gruppenspezifisches GUI (Anfänger, Leiharbeiter, Erfahrene etc.). Der Mensch bringt eine bessere Leitung, wenn er die Arbeitsmittel an sich anpassen kann und er fühlt, dass er ein Mitspracherecht hat. Außerdem sind alle Menschen verschieden und haben andere Vorstellungen von der Dialogführung.

Es ist zu beachten, dass nicht nur sichtbare Information angezeigt werden, sondern ggf. auch Verdeckungsgeometrien notwendig sind. Die Lagergeometrie ist leicht nachbildbar. Der Lagerinhalt ist schwieriger abzubilden, wenn die LHM und die Artikel darin nicht an fest definierten Orten sind. Bei Fachbodenregalen stehen die Behälter oder die Artikel oft lose im Lagerfach, so dass deren Position variieren kann. Das gilt ebenso für Paletten in Boden-Zeilen-Lagerung. In Durchlaufregalen, in Kommissioniernestern und v. a. an stationären Kommissionierarbeitsplätzen befinden sich die Bereitstelleinheiten an fest definierten Orten. Es gibt erste Ansätze,

aus den WMS-Daten heraus ein 3D-Modell des Lagers zu generieren [Kis-06]. Um das Lager exakt abzubilden, müsste auch die Pose aller Artikel bekannt sein. Sind die genaue Ausrichtung der Lagereinrichtung, die LHM und die Artikel bekannt, kann auch ein automatisiertes System eingesetzt werden. Deshalb wird sich in dieser Arbeit nur auf Verdeckungsgeometrien der Lagereinrichtung (der Regale) beschränkt, die für den Anwendungsfall der Kommissionierung ausreichend sind. Die Anforderungen an die Visualisierung zeigt Tabelle 5-5.

Anforderungen an die Visualisierung
<ul style="list-style-type: none">▪ Text, Bilder▪ 3D-Geometrien, keine kongruente Überlagerung▪ Zeichengröße mindestens 17 Pixel▪ geringe Informationsdichte▪ individuelle Anpassung der GUI an den Benutzer▪ Verdeckungsgeometrie: Lagereinrichtung (Regale)

Tabelle 5-5: Anforderung an die Visualisierung

5.3.2 Interaktion

Die benötigten Interaktion und Anforderungen an das Interaktionsgerät sind in Kapitel 5.2.4 zusammengefasst. An dieser Stelle werden kurz die softwareseitigen Anforderungen behandelt (siehe Tabelle 5-6).

Anforderungen an die Interaktion
<ul style="list-style-type: none">▪ durchgängige Verwendung der gleichen Metaphern▪ Verwendung bereits bekannter Metaphern▪ individuelle Anpassung▪ unmittelbare Reaktion auf jede Benutzereingabe (Reaktionszeit < 70 ms)▪ Multimodalität

Tabelle 5-6: Anforderung an die Interaktion

Es sollen stets die gleichen Metaphern verwendet werden. Da nur eine kurze Einlernphase nötig sein soll, die Bediener nicht zu den Hochqualifizierten gehören und möglichst wenig Fehler passieren dürfen, sollen einfache, bereits aus dem realen Leben bekannte Metaphern verwendet werden. Eine individuelle Anpassung wie bei der Visualisierung sollte ebenfalls möglich sein. Beim Umgang mit technischen Systemen fühlt man sich sicherer, wenn auf jede Aktion eine eindeutige Rückmeldung kommt. Dies kann optisch oder akustisch erfolgen. Dazu ist wiederum die menschliche Reaktionszeit zu beachten, so dass keine Verzögerungen länger als 70 ms sind.

AR bietet sich für multimodale Benutzerschnittstellen an. Die Informationsbereitstellung erfolgt hauptsächlich über den optischen Sinn, über die Datenbrille, aber sie kann auch akustisch von Statten gehen. Für die Eingabe von Informationen stehen die Sprache (verbal), aber auch die Hände zur Verfügung (haptisch).

5.4 Mensch

Bei der Entwicklung von AR-Systemen für den industriellen Einsatz ist zu beachten, dass der Entwickler oft ein ganz anderes gedankliches Modell hat wie der Benutzer. Er entwickelt eine Benutzerschnittstelle, die für ihn wie auch für den Anwender die gleiche Gestalt hat, aber beide gehen damit anders um (siehe Abbildung 5-4). Für den AR-Entwickler bzw. den AR-Benutzer sind Datenbrillen und die damit benutzten Metaphern etwas Alltägliches, während dies für einen Kommissionierer ganz neue Erfahrungen bringt. Darin besteht die Gefahr, die Anwendung am eigentlichen Nutzer vorbeizuentwickeln, weil ein unterschiedliches mentales Modell zugrunde liegt. Dadurch sind bei der Entwicklung eines derartigen Systems kontinuierlich Benutzerstudien durchzuführen. Bei jedem Menschen ist jeder technische Fortschritt willkommen, der die geistige Arbeit reduziert, aber dem Benutzer immer noch das Gefühl der Kontrolle über und der Freude an der Aufgabe gibt. So kann er seine mentalen Anstrengungen am Kern der Aufgabe einsetzen. Er soll seine mentalen Kräfte für die wichtigen Dinge nutzen und nicht für den Mechanismus verschwenden [Nor-02].

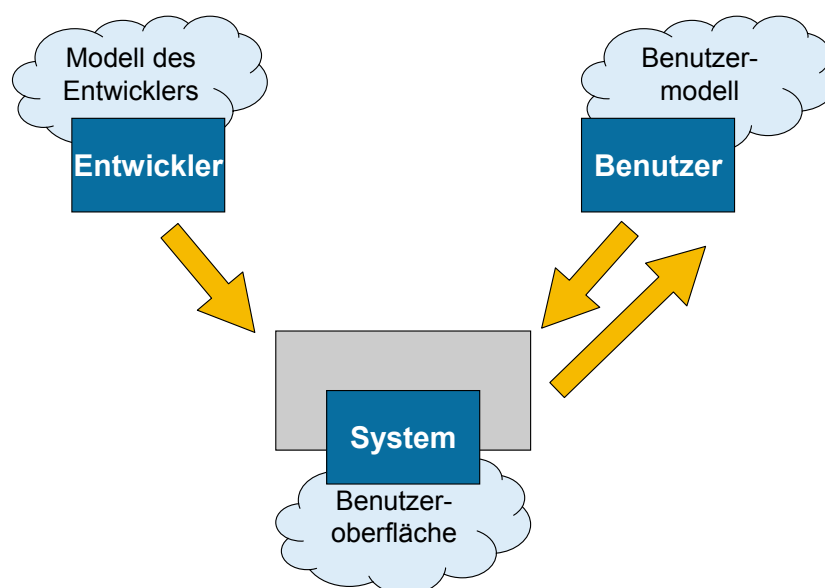


Abbildung 5-4: Unterschiedliches Modell von Entwickler und Benutzer (nach [Nor-02])

Beim Einsatz von Pick-by-Vision soll sich der Kommissionierer nur auf seine eigentliche Aufgabe konzentrieren, ohne dabei zusätzliche Tätigkeiten oder Gedanken an das AR-System zu verschwenden. Er muss mit dem System arbeiten, alle Tätigkeiten zum Einstellen des Systems übernimmt ein AR-Experte, z. B. die Kalibrierung, die pro Benutzer nur einmal nötig sein sollte.

Direkte Sicherheitsaspekte (z. B. Gesundheit, Tragekomfort über acht Stunden), aber auch indirekte Sicherheitsaspekte (Ablenkung durch AR-System, Arbeitsschutz) sind zu berücksichtigen [Pat-04], um eine hohe Akzeptanz bei den Kommissionierern zu erreichen. Der Benutzer darf sich durch das AR-System nicht in seiner Beweglichkeit eingeschränkt fühlen. Es sollen nur die relevanten Informationen in verständlicher Form und im erforderlichen Detaillierungsgrad dargestellt sein. Der Umgang mit der neuen Technologie muss natürlich sein, d. h. er darf die gewohnte Arbeitsplatzsituation nicht verändern [Fri-04]. Der Einsatz einer Datenbrille soll die physische und psychische Belastung der Mitarbeiter nicht erhöhen, sondern sie am besten noch senken, ohne sie aber zu unterfordern. Beim HMD-Einsatz erfolgt eine Senkung der körperlichen Belastung durch die Reduktion von Kopfbewegungen [FrL-06]. Die Bereitschaft für Arbeiten mit neuer Technologie ist hoch, wenn hoher Nutzen für die eigentliche Arbeit und damit verbundene Rahmenprozesse erkennbar ist [Bra-04].

Der Mensch ist grundsätzlich neugierig, offen für Neues und bis zu einem gewissen Grad risikobereit. Eine Ablehnung neuer Technologien ist in Bequemlichkeit, mangelnder Arbeitsmotivation, fehlender Veränderungsbereitschaft oder einer unzureichenden intellektuellen Fähigkeit, gesamtwirtschaftliche Zusammenhänge zu sehen, begründet [Sau-07]. Akzeptanzprobleme können durch

- Drohungen,
- Zwang,
- aufoktroyierte Ziele,
- geschickte persuasive Kommunikation oder
- finanzielle Anreize

gelöst werden, wobei sich bei den ersten drei erzwungenen Maßnahmen Widerstand gegen die Einführung neuer Technologien ergeben und dies langfristig der Organisation selbst schadet. Lösungsmöglichkeiten das Akzeptanzproblem anzugehen, sind

in der Literatur zu finden [Sau-07], speziell ein Leitfaden zur Einführung von AR-Systemen von Janzen et al. [Jan-04]. Es ist ein erfolgreiches Einführungskonzept notwendig, weil der Faktor Mensch eine wesentliche Variable ist, die auf die Effizienz und die Effektivität eines neuen AR-Systems Einfluss hat. Eine hohe Mitarbeiterzufriedenheit bei neuen Technologien wird erreicht, wenn sie von Anfang an bei der Einführung involviert sind und mitbestimmen können [Nor-02]. Hat beispielsweise der Mitarbeiter eine Mitgestaltungsmöglichkeit bei der Bedienoberfläche, akzeptiert er die Lösung und weiß sofort, welche Informationen er wo findet. Ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess soll möglich sein. Die Mitarbeiter müssen Vorteile in der neuen Technologie sehen und auf diesen Nutzen müssen sie hingewiesen werden. Eine neue Kommissioniertechnologie führt zu Zeitersparnis und geringeren Fehlerquoten, was sich positiv auf den Lohn des Mitarbeiters auswirkt. Eine schnelle Erlernbarkeit und das Wissen über kompetente Ansprechpartner (bzw. Bedienungsanleitung) bei Problemen fördern die Akzeptanz. Der Mitarbeiter soll stets das Gefühl haben, dass er das System beherrscht. In der Kommissionierung arbeiten Menschen unterschiedlichen Alters. Mit dem Alter ändert sich die menschliche Leistungsfähigkeit, wovon auch die visuellen Fähigkeiten betroffen sind, und die Einstellung und Akzeptanz gegenüber neuen Technologien. Die Anforderungen an Pick-by-Vision aus Sicht des Benutzers sind in Tabelle 5-7 dargestellt.

Anforderungen aus menschlicher Sicht
<ul style="list-style-type: none">▪ mentale Modell des Benutzers berücksichtigen▪ direkte und indirekte Sicherheitsaspekte▪ Mitarbeiter in Einführung mit einbeziehen▪ Nützlichkeit aufzeigen▪ schnelle und intuitive Erlernbarkeit▪ ergonomisch, aber auch ästhetisch ansprechendes Design▪ mögliche Ansprechpartner bzw. verständliche Bedienungsanleitung zur Seite stellen▪ individuell anpassbares System

Tabelle 5-7: Anforderungen aus menschlicher Sicht

6 Konzeption und Systementwurf

In diesem Kapitel wird ein Pick-by-Vision-System für den Anwendungsfall des konventionellen Kommissionierens konzipiert. Dieses Anwendungsszenario bietet alle Möglichkeiten der AR-Unterstützung und kann somit auf die anderen Einsatzfelder übertragen werden. Als erster Schritt werden der Kommissionierprozess und die benötigten Daten genauer spezifiziert. Anschließend erfolgt die Auswahl der geeigneten Hardwarekomponenten Datenbrille, Trackingsystem und Interaktionsgerät, bevor ein speziell an diese Gerätekonfiguration angepasstes UI entwickelt wird.

6.1 Betrachteter Kommissionierprozess

Bei einem papierlosen Kommissioniersystem wie Pick-by-Vision erfolgt zunächst der Login (Benutzername, ggf. Passwort), so dass die Aufträge den Mitarbeitern zugeordnet werden können. Nach dem Login befindet sich der Benutzer im Startmenü. Er kann nun einen Auftrag anfordern oder über die Einstellungen, das System individuell auf seine Eigenheiten konfigurieren. Bis hierhin ist der Prozessablauf unabhängig vom Kommissionierszenario. Beim konventionellen Kommissionieren (siehe Abbildung 6-1) beginnt die Bearbeitung eines bzw. mehrerer Kommissionieraufträge mit der Aufnahme der Sammelbehälter, die der Mitarbeiter auf dem Kommissionierwagen abstellt. Er muss die Sammelbehälter mit den Aufträgen verheiraten, so dass bei der Ablage der Artikel eine eindeutige Zuordnung vorhanden ist. Nach der Aufnahme der Sammelbehälter erhält er die Weginformationen zum ersten Lagerplatz. Der Lagerplatz kann eine Palette (Schnelldreher) oder innerhalb eines Fachbodenregallager (Langsamläufer) sein. Für den Prozessablauf hat dies keine Auswirkungen. Nähert er sich dem Lagerplatz, benötigt er die Entnahmeinformationen. Ob ihm Weg- und Entnahmeinformationen gleichzeitig oder sequentiell mit manuellem oder automatischem Umschalten angezeigt werden, wird bei der Gestaltung des UI festgelegt. Nach der Entnahme muss er diese quittieren, und der entsprechende Ablageort wird hervorgehoben. Erkennt er eine Fehlmenge, muss er vor der Quittierung die Möglichkeit haben, diese zu melden. Die Prozessschritte Weg-, Entnahme- und Ablageinformation wiederholen sich iterativ bis alle Aufträge vollständig sind. Er bringt alle Sammelbehälter zu einer zentralen Abgabestelle. Eine Wegunterstützung zur Basis,

zu den leeren Sammelbehältern oder zum zentralen Abgabeort bietet keine Potenziale für AR, weil diese immer gleich sind. Weitere vor- und nachbereitende Prozessschritte werden nicht betrachtet.

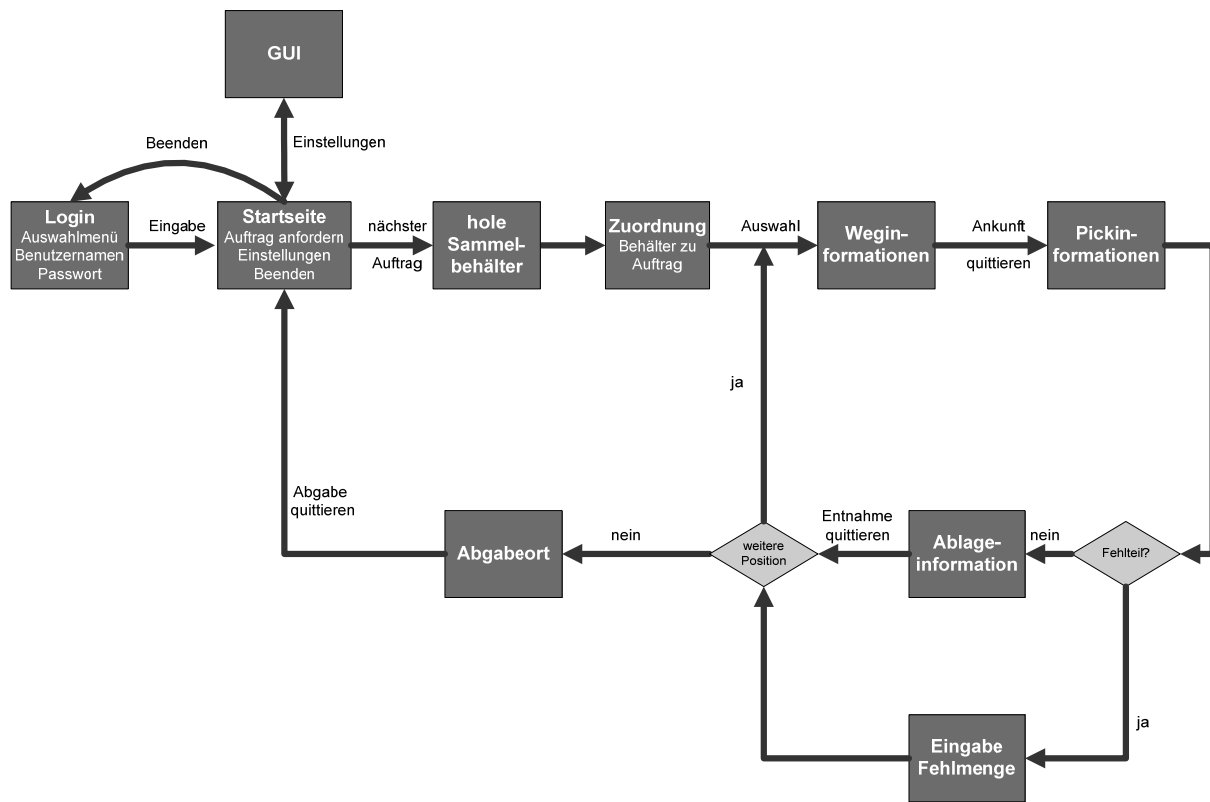


Abbildung 6-1: Prozess für paralleles, konventionelles Kommissionieren mehrerer Aufträge

6.2 Datenbrille

Die Datenbrille ist die entscheidende Schnittstelle zwischen dem Benutzer und dem Pick-by-Vision-System. Bei der Auswahl sollen nicht nur Aspekte der Bilddarstellung, sondern vor allem benutzerbezogene Punkte betrachtet werden. Bereits vor der Auswahl ist zu erwähnen, dass derzeit kein auf dem Markt befindliches HMD als bevorzugt angesehen werden kann, weil alle große Nachteile besitzen.

6.2.1 Bewertung verfügbarerer monokularer Datenbrillen

Bereits in den Anforderungen wurde festgelegt, dass für diesen Anwendungsfall nur monokulare Datenbrillen in Frage kommen (siehe Kapitel 5.2.2). Im Folgenden werden sieben monokulare Datenbrillen näher betrachtet (siehe Tabelle 6-1).








HMD	Abbildung	Display	Ergonomie / Praxistauglichkeit
icuiti M920-CF		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Look-Around, VST (LCD) ▪ 640x480 Pixel ▪ 26° diagonal ▪ 0,033°/Pixel ▪ 60 Hz ▪ farbig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100 g (inkl. Systemträger) ▪ äquivalent zu 17" Monitor in 3,4 m Entfernung ▪ Akkulaufzeit bis 5 Stunden (Industrieversion ohne eigene Stromversorgung) ▪ VGA-Anschluss ▪ FoVE eingeschränkt
Liteeye LE 750		<ul style="list-style-type: none"> ▪ OST (OLED) ▪ 800x600 Pixel ▪ 28° diagonal ▪ 0,035°/Pixel ▪ 60-85 Hz ▪ farbig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 80 g (ohne Systemträger) ▪ Akkulaufzeit 40 Stunden ▪ industrietauglich ▪ VGA ▪ FoVE etwas eingeschränkt durch Systemträger
Lumus PD-18		<ul style="list-style-type: none"> ▪ OST (LOE: Light-guide Optical Element, von Lumus patentiert) ▪ 800x600 Pixel ▪ 32° diagonal ▪ 0,040°/Pixel ▪ 60 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 70 g (ohne Systemträger) ▪ an Brille montierbar ▪ USB-Anschluss ▪ industrietauglich ▪ keine Einschränkung FoVE ▪ ungünstige Schwerpunktlage (Gewicht v. a. auf Nase)
Microoptical SV-6 PC		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Look-Around, VST (LCD) ▪ 640x480 Pixel ▪ 20° diagonal ▪ 0,025°/Pixel ▪ 60 Hz ▪ farbig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 35 g (ohne Systemträger) ▪ an Brille montierbar ▪ Akkulaufzeit von 5 Stunden ▪ VGA ▪ FoVE eingeschränkt
Microvision Nomad ND 2000		<ul style="list-style-type: none"> ▪ VRD ▪ 800x600 Pixel ▪ 23x17,25° (28,75° diagonal) ▪ 0,036°/Pixel ▪ 60 Hz ▪ monochrom rot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 128 g (ohne Systemträger) ▪ Systemträger: Mütze oder Kopfträger ▪ 17" Display in Armlänge ▪ Akkulaufzeit 8 Stunden ▪ VGA ▪ brillenkompatibel ▪ keine Einschränkung FoVE
Rockwell Collins Optronics ProView SO35		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Look-Around ▪ 800x600 Pixel ▪ 28x21° (35° diagonal) ▪ 0,044°/Pixel ▪ 56-85 Hz ▪ farbig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 67 g, Befestigung 79 g (ohne Systemträger) ▪ industrietauglich ▪ brillenkompatibel ▪ FoVE etwas eingeschränkt ▪ ungünstige Schwerpunktlage
Shimadzu Data Glass 2/A		<ul style="list-style-type: none"> ▪ OST ▪ 800x600 Pixel ▪ 30° diagonal ▪ 0,038°/Pixel ▪ 60 Hz ▪ farbig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 80 g (inkl. Systemträger) ▪ 13" Monitor in 60cm Entfernung ▪ keine eigene Stromversorgung, über Rechner (USB) ▪ nicht industrietauglich ▪ FoVE kaum eingeschränkt

Tabelle 6-1: Betrachtete Datenbrillen

Das geforderte FoVD von 35° horizontal weist nur ein HMD auf und bezogen auf die Auflösung erreicht aufgrund des Zielkonflikts zwischen Auflösung und FoVD keines die Anforderung. Die Auflösung liegt zwischen 1,5 und 2,6'/Pixel. Das FoVE wird nur bei zwei HMDs nicht eingeschränkt. Beim Gewicht spielt die Industrietauglichkeit eine wesentliche Rolle. Robustere HMDs für den militärischen oder industriellen Einsatz sind schwerer, aber alle Displays sind ohne Systemträger leichter als 200 g. Allerdings ist vor allem bei Displays, die an Brillen montiert werden, zu beachten, dass diese eine schlechte Schwerpunktlage aufweisen. Bei der Stromversorgung gibt es zwei Varianten. Entweder es ist ein eigenes Netzteil vorhanden oder das Display bezieht die Energie vom mobilen Rechner, mit dem es meistens über ein VGA- oder ein USB-Kabel verbunden ist. Die meisten Datenbrillen sind nicht für den industriellen Einsatz ausgelegt oder schränken das FoVE ein. Das größte Potenzial für den Anwendungsfall Kommissionierung weist das Microvision Nomad ND2000⁴⁰ auf, weil es das FoVE nicht einschränkt, robust konzipiert ist und es wegen seiner monochromen Darstellung und der direkten Projektion auf die Netzhaut einen guten Kontrast wiedergibt. Tabelle 6-2 veranschaulicht die Bewertung der Datenbrillen.

Kriterium \ Gerät	FoVD	FoVE	Auflösung	Bildwiederholfrequenz	Gewicht, Ergonomie	Industrietauglichkeit
icuiti M920-CF	o	-	-	+	++	-
Liteeye LE 750	o	o	-	++	o	++
Lumus PD-18	+	++	-	+	o	o
Microoptical SV-6 PC	-	-	o	+	+	-
Microvision Nomad ND 2000	o	++	-	+	+	++
Rockwell Collins Optonics ProView SO35	++	o	--	++	--	++
Shimadzu Data Glass 2/A	+	+	-	+	++	--

Tabelle 6-2: Bewertung der Datenbrillen

⁴⁰ im weiteren Verlauf nur noch als Nomad bezeichnet

6.2.2 Ausgewählte Datenbrille

Das Nomad ist ein Virtual Retinal Display⁴¹, das vom HITL Anfang bis Mitte der 1990er entwickelt wurde. Die Weiterentwicklung erfolgte durch das Spin-off Microvision [Tid-95]. Ein VRD ist kein bildschirmbasiertes System, sondern projiziert direkt auf die Netzhaut, so dass keine zusätzliche Projektionsfläche nötig ist (siehe Abbildung 6-2). Die Lichtquelle emittiert ein zeitlich und räumlich kohärentes (gleiche Phase) und monochromatisches Licht mit geringer Divergenz und hoher Lichtintensität. Ein Laser im Bereich von 300 nW gleitet über die Netzhaut, so dass diese nicht konstant belichtet ist (Belichtungszeit 40 ns) [Vii-97]. Ein mechanischer Scanner, bestehend aus zwei oszillierenden Spiegeln, lenkt den Laserstrahl entsprechend ab [Chi-03]. Über einen Strahlteiler vor dem Auge wird der Strahl nochmals in Richtung Retina umgelenkt, so dass diese zeilenweise stimuliert wird. Da es sich im Gegensatz zu anderen OST-HMD um keinen halbdurchlässigen Spiegel handelt, verdunkelt sich das Bild nicht [Sut-06] und das FoVE wird nicht eingeschränkt.

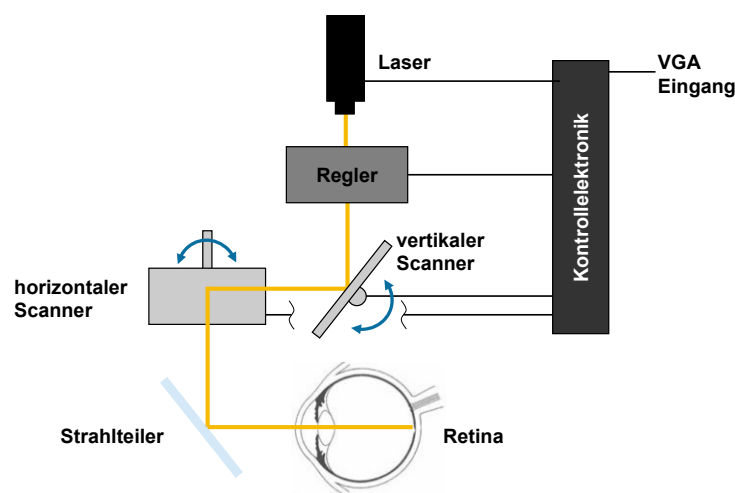


Abbildung 6-2: Funktionsweise eines VRD (nach [Vii-98])

Das Nomad besitzt eine sichtbare Lichtquelle, die komfortabler zu sehen ist als Lichtquellen, die ultraviolettes oder infrarotes Licht enthalten. Weitere Vorteile liegen v. a. im guten Kontrast, der hohen Auflösung und darin, dass die Umgebungshelligkeit aufgrund der direkten Projektion auf die Netzhaut keine Rolle spielt. Die Umgebung muss nicht abgedunkelt werden und eine Anwendung ist somit auch im Freien sehr gut möglich. Die Auflösung wird nicht durch das Display beschränkt, sondern

⁴¹ wird auch Retinal Scanning Display genannt

von den optischen Komponenten, z. B. dem Umlenkspiegel, dessen Geschwindigkeit oder der Ansteuerelektronik. Scharfe und kontrastreiche Bilder sind für AR wichtig. Der geringe Energieverbrauch und die kleine und leichte Bauweise durch die wenigen Elemente sind weitere Vorteile ([Sut-06], [Tid-95]). Der halbdurchlässige Spiegel lässt sich wegklappen, wenn die virtuellen Informationen nicht mehr gebraucht werden.

Beim Nomad ist eine schwierige und zeitaufwendige Kalibrierung nötig, denn die reale Kamera (das Auge) und die virtuelle Kamera, die der Rechner benutzt, müssen übereinstimmen. Dazu müssen die äußeren (Position und Orientierung) und inneren Kameraparameter (Brennweite, Position und Skalierung der Projektionsfläche) bestimmt und dem menschlichen Auge angepasst werden. Bei der Single Point Active Alignment Method (SPAAM) erfolgt dies durch eine interaktive Kalibrierung durch den Betrachter [TuM-00]. Der Benutzer muss dabei mehrere imaginäre Punkte im Display von mehreren Blickwinkeln mit einem Punkt der realen Welt zur Deckung bringen. Der Anwender kann und soll sich dabei frei bewegen.

Die Laserprojektion direkt in das Auge ist unbedenklich, denn es wird ein System mit abtastender Strahltechnologie und einem Laser mit niedriger Leistung eingesetzt [Mic-05]. Der Laser erfüllt den IEC 60825-1 Standard als ein Class 1 Laser [IEC60825], ist damit sicher für kontinuierliches Sehen ausgelegt und wird als nicht gefährlich eingestuft, wenn er für die geplanten Zwecke verwendet wird. Die Strahlungswerte sind unter den Levels, die die ANSI⁴² vorgibt [Vir-97]. Das Nomad hat eine Absicherung, das Laserlicht sofort abzuschalten, wenn potenzielle, gefährliche Bestrahlung auftritt (z. B. wenn der Scanner stoppt und der Laser auf einer Stelle verweilt). Im Anschluss an eine mehrwöchige industrielle Versuchsreihe wurde nach medizinischen Nachuntersuchungen eine physiologische Schädigung der Augen ausgeschlossen [FrL-06].

6.3 Trackingsystem

Es ist immer die Frage zu stellen, ob der Einsatz eines Trackingsystems notwendig ist. Bei Untersuchungen zur Erfordernis eines Trackingsystems wurden keine Unter-

⁴² ANSI: American National Standards Institute

schiede zwischen dem System mit und dem ohne Tracking gefunden [Oeh-04]. Dies hängt von der Größe und der Bekanntheit des Arbeitsplatzes und der Komplexität der Suchaufgabe ab. Bei manchen Anwendungen wie der Instandhaltung ist Tracking für eine grobe Führung sinnvoll, aber bei präziser Überlagerung ist ein hoher technischer und finanzieller Aufwand mit einem unbefriedigenden Nutzen verbunden [Sas-08]. Die Notwendigkeit, ein Trackingsystems bzw. dessen Potenziale zu untersuchen, ist ein Teil dieser Arbeit. Das Trackingsystem muss in diesem Fall zwei Aufgaben erfüllen: die Wegfindung im Lager und die Hervorhebung des Entnahme- bzw. des Ablageortes. Zunächst wird ein für diese Aufgaben geeignetes Verfahren ausgewählt und anschließend die Systemkonfiguration näher erläutert.

6.3.1 Bewertung verfügbarer Trackingverfahren

Analog zur Auswahl der Datenbrille lässt sich sagen, dass ein Tracker, der die sehr hohen Anforderungen wie eine hohe Genauigkeit über große Entfernungen erfüllt, nicht existiert [Azu-01a]. In einem ersten Schritt gilt es, grundsätzlich mögliche physikalische Verfahren auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz im Lager anhand der Anforderungen zu prüfen.

WLAN und RFID bieten keine sechs DoF und sind zu ungenau für die Anwendungen. Alleine können sie nicht eingesetzt werden, nur in Kombination mit anderen Verfahren. Inertiales Tracking benötigt ein Referenzsystem, so dass ebenfalls ein zweites System nötig ist. Magnetische Verfahren sind wegen ihrer Störanfälligkeit im Produktionsumfeld ebenso nicht geeignet wie akustische. Mechanisches Tracking des Benutzers ist wegen der Einschränkung der Bewegungsfreiheit auszuschließen, allerdings ist ein relatives Tracking des Kommissionierwagens denkbar, denn pedometrisches Tracking, z. B. das Zählen der Schritte oder der Umdrehungen von Rädern, fällt auch darunter. Somit bestätigt sich auch in dieser Untersuchung, dass sich für Anwendungen im industriellen Umfeld optische Verfahren am besten eignen (analog zu [Alt-03], [BaG-04], [Pat-04]). Sie sind sehr genau und weisen eine hohe Mobilität sowie eine niedrige Latenz auf. Die Leistungsfähigkeit von outside-in hängt von der Anzahl Kameras und der Sichtbarkeit der Marker ab und beim inside-out von den Eigenschaften der Kameras (Brennweite, Auflösung), dem Abstand oder dem Winkel zu den 2D-Markern [Pen-06]. Markerbasiertes Tracking ist im industriellen Umfeld problematisch, weil nicht überall Marker angebracht werden können [Küc-03] und es

zu Verschmutzungen kommen kann. Das Trackingsystem muss an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Tabelle 6-3 fasst die Überlegungen zusammen.

Kriterien Verfahren	Genauigkeit		Update- rate		DoF		Robustheit		Messraum		Ergonomie	
	Akustisch	0,5-6 mm 0,1-0,5°	+	25- 200 Hz	+	6	++	stark von Umgebungsbedingungen abhängig	--	250- 4.500 mm	○	klein, leicht
Magnet (Kompass)	1°	-	300 Hz	++	1	--	elektromagn. Felder und Metall stören	--	unbegrenzt	++	klein	++
Elektromagnetisch	0,1-2,5 mm 0,1-0,5°	++	100- 250 Hz	++	6	++	elektromagn. Felder und Metall stören	--	bis 5.000 mm	○	klein	+
WLAN	1-2 m	--		+	2	-	elektromagn. Felder und Metall stören	○	skalierbar	+	klein	++
RFID	+/- 150 mm	-	20 Hz	-	2	-	Metall stört	○	skalierbar	○	klein	+
Inertial	0,2°	+	50- 1.500 Hz	++	3 +	○	Drift (braucht Referenz)	○	unbegrenzt	++	klein	○
Mechanisch	0,1-2,5 mm	++	bis 300 Hz	++	6	++	sehr robust	++	begrenzt	--	Mensch an Gestänge	--
Optisch outside-in	0,1-0,5 mm 0,01-0,1°	++	15- 400 Hz	+	6	++	lichtabhängig, Sichtverbindung nötig	+	bis zu 6.000 mm (passive Targets)	+	Target am Benutzer	○
Optisch inside-out	0,5-4,5 mm 0,05-0,4°	+	15- 400 Hz	+	6	++	lichtabhängig, Sichtverbindung nötig	+	skalierbar	+	Kamera am Benutzer	+

Tabelle 6-3: Vergleich von Trackingverfahren

6.3.2 Trackingverfahren für die Kommissionierung

Für das konventionelle Kommissionieren werden zwei Varianten von optischem Tracking betrachtet. Zum einen optisches inside-out mit einer Video- oder IR-Kamera am Kommissionierer und zum anderen ein outside-in Verfahren mit IR-Kameras, die den Arbeitsbereich abdecken.

6.3.2.1 Optisches inside-out Tracking

Der Kommissionierer trägt am Kopf oder auf der Schulter ein IR-Sensorsystem (kurz: Sensor). An der Decke sind in einem dem System bekannten Muster LEDs angebracht. Der Sensor erkennt das Muster der LEDs. Dadurch kann die Position, Orientierung und bei einer Montage des Sensors am Systemträger des HMD auch die Blickrichtung des Kommissionierers bestimmt werden. Neben dem Mitarbeiter muss auch

die Position des Kommissionierwagens für die optische Hervorhebung der Ablage bestimmt werden. Dies erfolgt nach dem gleichen Prinzip, indem auch auf dem Wagen ein Sensor montiert wird. Der Vorteil ist, dass pro Mitarbeiter nur zwei der relativ teuren Sensoren benötigt werden. Die Sicht zur Decke ist nicht versperrt, so dass eine optimale Sichtverbindung zwischen LEDs und Sensor vorherrscht. Diese Anwendung kann auch in relativ niedrigen und wegen der aktiven LEDs auch in dunklen Räumen eingesetzt werden. Die Räume bzw. die Ebenen sind aufgrund der optimalen Raumnutzung in derartigen Fachbodenregallagern selten höher als die Regale. Vorteilhaft bei mehrstöckigen Fachbodenregalen ist, dass die Regale und Ebenen fest miteinander verbunden sind, so dass eine einmalige Kalibrierung ausreichend ist. Die Paletten für die Schnelldreher müssen an fixen, über Bodenmarkierungen definierten Positionen abgestellt sein. Das System ist beliebig skalierbar, solange Platten mit unterschiedlichen LED-Mustern an der Decke montiert werden können. Nachteilig ist, dass die gesamte Decke über den Gängen mit den LEDs ausgestattet werden muss und die LEDs eine Stromversorgung benötigen. Dies macht das Lager für Umbauten unflexibel. Außerdem ist zu klären, wie der Sensor ergonomisch am Mitarbeiter angebracht werden kann und wie dies von ihm akzeptiert wird (siehe Abbildung 6-3).

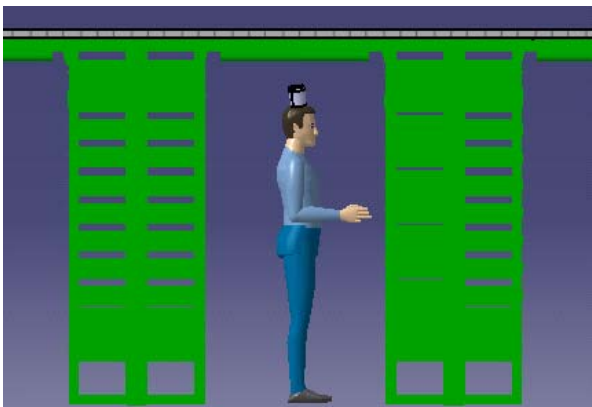


Abbildung 6-3: Kommissionierer mit einem
inside-out-System

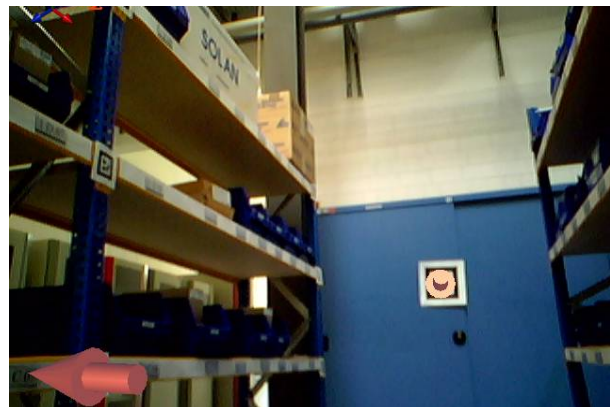


Abbildung 6-4: Groborientierung an großem
Marker, Feinorientierung an kleinem Marker

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von papiermarkerbasiertem inside-out Tracking. Eine Kamera wird am Kopf, z. B. am Systemträger des HMD, angebracht. Die Kamera nimmt bis auf einen kleinen Offset das gleiche Bild der Lagerumgebung wie der Kommissionierer wahr. Damit immer genügend Papiermarker im Sichtfeld der Kamera sind und das Tracking nicht abreißt, wird der Lagerbereich mit genügend

Markern ausgestattet. Wenn jedes Lagerfach über einen Marker verfügt, sind diese oft schlecht erkennbar, weil sie sehr klein sind und der Winkel meist zu spitz ist. Werden nur wenige große Marker an den Gassenenden angebracht, sind diese nicht im Blickfeld, wenn in ein Lagerfach gegriffen wird. Deshalb sollte ein Multi-Marker-Verfahren angewandt werden (siehe Abbildung 6-4). Über große Marker an den Enden der Lagergassen kann ein grobes Tracking für die Wegfindung erfolgen, d. h. der Benutzer wird ungefähr zum Lagerplatz geführt. Über mehrere kleine Marker an der Greiffront wird ein feines Tracking für die Entnahme durchgeführt. Marker an den unteren Ebenen im Regal sind oft nicht im Sichtfeld, weil der Benutzer nicht automatisch nach unten blickt. Deshalb ist es sinnvoll, das Tracking nur über Marker an den Ebenen zwischen Hüft- und Augenhöhe durchzuführen. Die Position der Lagerfächer in den Ebenen darunter bzw. darüber müssen daraus berechnet werden. Da es sich bei Regalen um statische Objekte handelt, bleiben die Positionen der Lagerfächer untereinander gleich, so dass nur eine einmalige Kalibrierung nötig ist. Marker an Paletten befinden sich in Bodennähe, sind relativ klein und somit schwer zu erkennen. Deshalb sollten die Palettenplätze über Marker an der Wand oder an Schildern dahinter identifiziert werden. Die relative Position zwischen Marker und Palette wird über Bodenmarkierungen bewerkstelligt. Da es trotzdem Situationen gibt, in denen weder der Gassen- noch der Lagerfachmarker erkannt werden, kann ein zusätzlich integrierter Inertialsensor das Tracking übernehmen bis der nächste Marker wieder im Blickfeld ist. Obwohl Markertracking im industriellen Umfeld problematisch ist, gibt es gerade in der Kommissionierung einen interessanten Aspekt. Die Anfänge von ARToolKit gehen auf 2D-Marker zurück, die auf 2D-Barcode basieren ([Kat-99], [Rek-00]). Das Design der Marker ist so gewählt, dass sie auch mit Verzerrung gelesen werden können, wenn sie nicht perfekt vor der Kamera liegen. In der Logistik wird meist der 1D-Barcode verwendet, der bei Kommissioniersystemen mit Scanner auch an den einzelnen Lagerfächern für eine Identifizierung des richtigen Lagerorts angebracht sein kann. Wird anstelle des 1D- ein 2D-Barcode an den Lagerfächern angebracht, kann dieser ohne Mehraufwand für das Tracking benutzt werden. Es sind nur die Gassenmarker für die grobe Führung zu installieren. Marker am Kommissionierwagen übernehmen die Identifizierung des Ablageorts (siehe Abbildung 6-5). Ein Tracking der einzelnen Behälter wäre auch denkbar, aber die Marker müssten an der offenen Oberseite angebracht sein, weil die anderen Seiten kaum im Blickfeld sind, wenn der Wagen genau vor dem Benutzer steht. Eine Platzierung der

Marker an der Oberseite ohne Einschränkung der Funktionstüchtigkeit des Behälters (Stapelbarkeit, Nutzung des gesamten Volumens) ist nicht möglich. Es ist sicherzustellen, dass die Marker nicht verschmutzt oder beschädigt werden. Demgegenüber stehen die geringen Hardwarekosten und die Skalierbarkeit (Größe, Anzahl Kommissionierer in diesem Bereich) dieser Lösung. Diese Vorteile bietet auch eine markerlose Lösung über Tracking der Kanten der Regale. Es ist aber zu beachten, dass nahezu jede Regalgasse bzw. sogar jedes Regalfach die gleichen Kanten aufweist und so ist zu gewährleisten, dass jeweils die richtige Kante erkannt wird. Beispielsweise kann das System mit einem Grobtrackingverfahren kombiniert werden, das den Kommissionierer in die richtige Gasse führt. Sobald er vor der Gasse ist, wird die vorderste Kante erkannt (Initialisierung), die Führung in der Gasse übernimmt das markerlose Tracking, das die Geometrie der gesamten Lagergasse kennt. Bei der Ablage wird der Kommissionierwagen über markante Kanten erkannt, weil diese Kanten im Vergleich zu mehreren darauf stehenden Sammelbehältern eindeutig sind. Deren Position auf dem Kommissionierwagen ist fest definiert.



Abbildung 6-5: Kommissionierwagen mit Marker



Abbildung 6-6: Kommissionierwagen mit IR-Target

6.3.2.2 Optisches outside-in Tracking

Optisches IR-Tracking ist ein weitverbreitetes Verfahren, sowohl in Laborumgebungen (v. a. VR-Anwendungen) als auch im industriellen Bereich. Die Kameras senden IR-Blitze aus, die von Trackingkugeln mit ihrer speziellen Oberfläche sehr gut reflektiert werden (siehe Abbildung 6-7). Die optischen Kameras nehmen ein 2D-

Graustufenbild dieser Szene auf und schicken das jeweilige 2D-Bild an den Trackingrechner, der daraus die Pose des Targets berechnet. Als Referenzgeometrien für das Tracking werden passive Marker bestehend aus mehreren Kugeln auf dem Systemträger der Datenbrille angebracht. Das gesamte Target muss groß genug sein, damit es die Kameras gut erfassen kann, und klein genug, dass es den Kommissionierer nicht behindert. Analog wird ein weiteres Target am Kommissionierwagen angebracht (siehe Abbildung 6-6). Targets an jedem einzelnen Behälter sind auszuschließen. Für eine Gasse mit 4 m Länge sind mindestens drei IR-Kameras nötig, um ein robustes Tracking zu gewährleisten. Eine Kamera steht am Anfang, die beiden anderen am Ende der Gasse. Bei längeren Gassen sind zusätzliche Kameras in der Mitte anzubringen. Wenn genügend Platz über den Regalen ist, können Kameras von oben mehrere Gassen abdecken. Das System ist skalierbar, allerdings nicht über die Anzahl der Referenzen, sondern über die teuren Kameras. In dem Bereich können auch mehrere Kommissionierer gleichzeitig arbeiten.

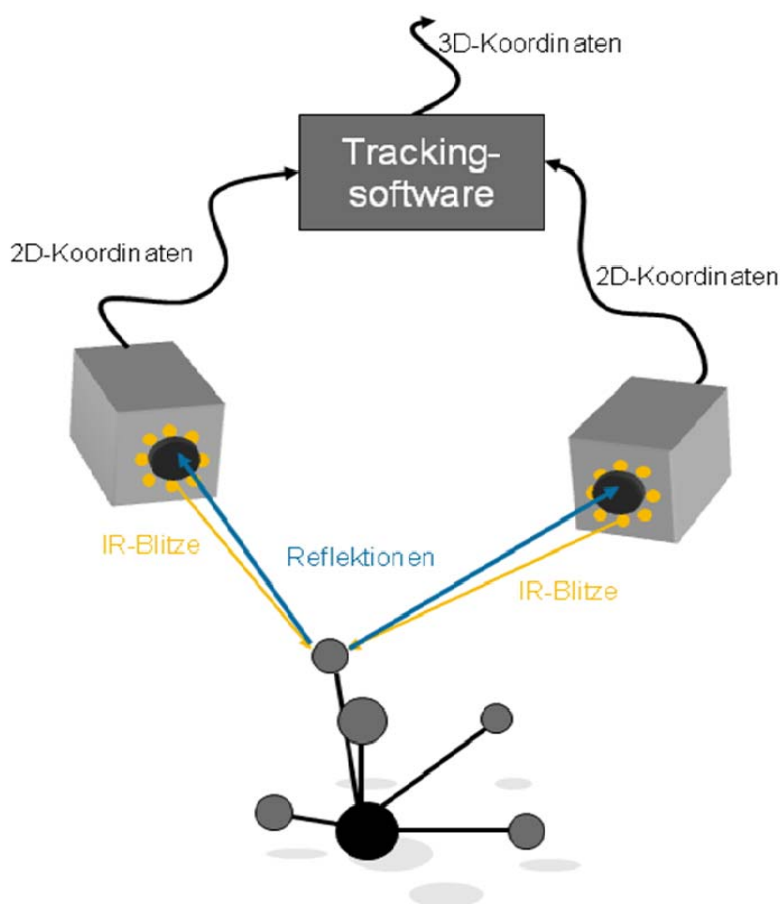


Abbildung 6-7: Funktionsweise von outside-in IR-Trackingsystemen

Der Kommissionierer und der Kommissionierwagen werden über die Targets identifiziert. An den Regalen und Abstellplätzen für die Paletten sind keine Referenzen angebracht, so dass deren Ausrichtung zum Weltkoordinatensystem über eine Kalibrierung erfolgen muss. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems kann beliebig gewählt werden, so lange sich die Pose aller Objekte innerhalb dieses Bezugssystems einfach berechnen lassen. Beispielsweise ist der Ursprung mittig am Anfang der ersten Gasse. Auch wenn sich die Position zwischen den Kameras und der Lagereinrichtung nicht ändert, weil diese fest verankert sind, muss das System ab und an neu kalibriert werden.

6.3.2.3 Zusammenfassung der Einsatzszenarien

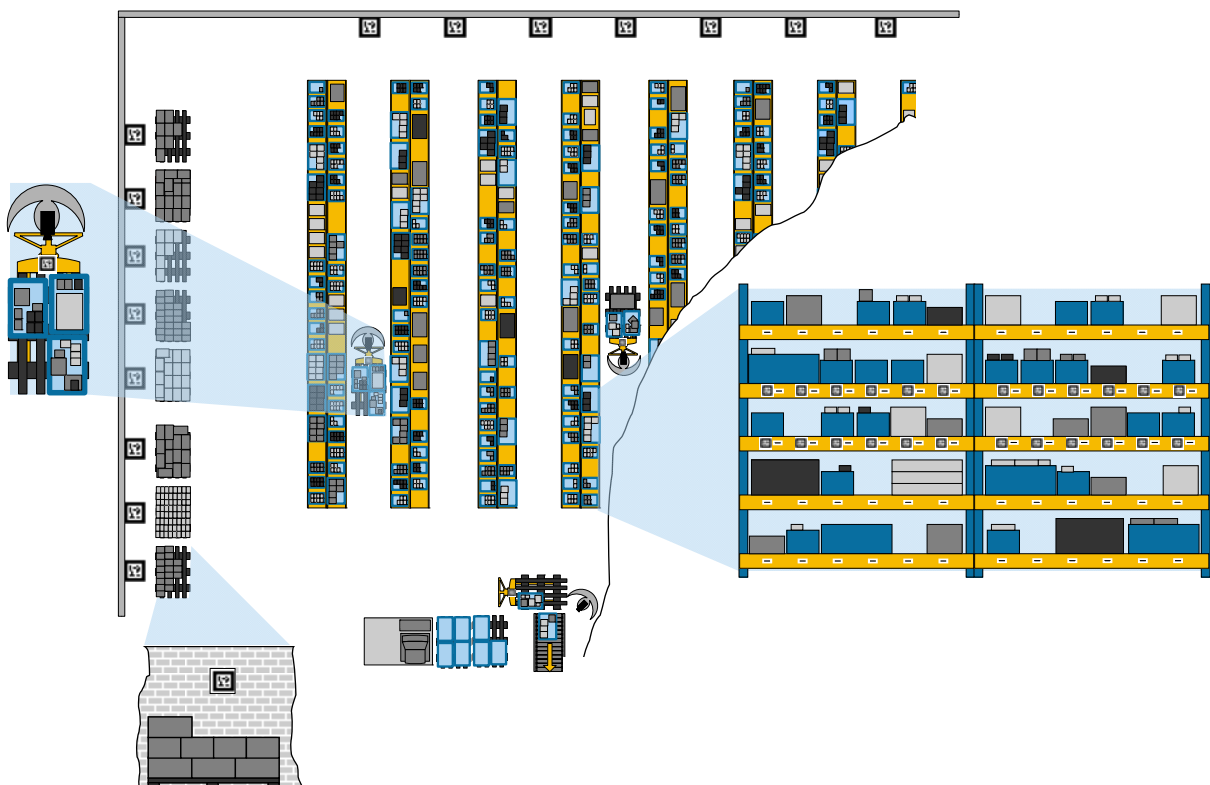


Abbildung 6-8: Papiermarkerbasiertes inside-out Tracking in Szenario 1

Bei einem konventionellen Kommissioniersystem mit einem größeren Lagerbereich eignet sich der Einsatz eines inside-out Systems mit einer Videokamera am besten (siehe Abbildung 6-8). Dieses System ist skalierbar und mit einer relativ günstigen Hardware umzusetzen. Eine grobe Positionsbestimmung erfolgt über große Marker an den Gassenenden und die Feinpositionierung über kleine Marker (2D-Barcode) an den mittleren, meistens im Blickfeld befindlichen Ebenen. Die Position der Lager-

fächer in den anderen Ebenen wird daraus und nicht über das Weltkoordinatensystem berechnet. Genauigkeitsfehler wirken sich damit nicht so stark aus. Der Einsatz eines Inertialsensors ist nötig, um Tracking zu gewährleisten, wenn kein Marker im Blickfeld ist. Eine Verschmutzung und Beschädigung der Marker beeinträchtigt die Funktionsfähigkeit des Systems. Alternativ lassen sich markerlose Verfahren einsetzen, die sich noch in der Entwicklungsphase befinden. Es müssen nicht nur die richtigen Kanten erkannt werden, sondern die Realität muss mit dem hinterlegten CAD-Modell übereinstimmen. Um das markerlose Tracking zu initialisieren und eine grobe Führung zur richtigen Gasse zu erreichen, können Verfahren wie WLAN oder RFID verwendet werden.

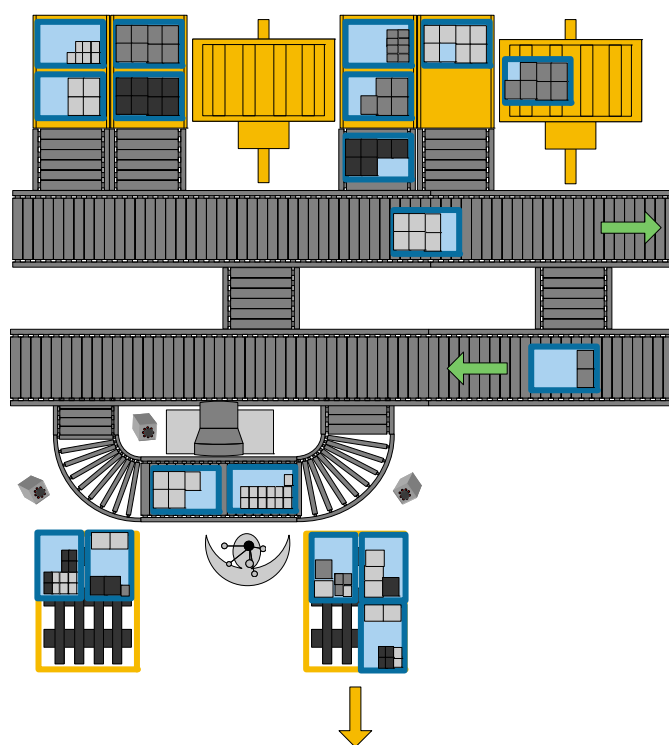


Abbildung 6-9: IR outside-in Tracking für Szenario 4 mit fest definierter Position der Sammelbehälter (Rahmen um die Palette)

Für kleinere Umgebungen wie für die Kommissionierung entlang einer Regalzeile, Kommissioniernester oder stationäre Arbeitsplätze ist der Einsatz des robusteren outside-in IR-Trackings möglich. Ein Setup mit vier bis sechs Kameras kann diese Arbeitsbereiche abdecken (siehe Abbildung 6-9). Es ist kein zusätzlicher Sensor erforderlich und bei einer geschickten Integration der Targets (passive oder auch aktive) beeinträchtigen diese die Arbeit des Kommissionierers nicht. In diesen Einsatzszenarien arbeitet jeweils nur ein Kommissionierer in dem Bereich. Da ein Kommis-

sioniersystem aus mehreren derartigen Arbeitsplätzen besteht, kann das Setup an jedem Arbeitsplatz eingesetzt werden. Eine Zusammenfassung der möglichen Trackingverfahren für die Kommissionierung zeigt Tabelle 6-4.

Verfahren Kriterium	inside-out			outside-in
	IR	Marker	markerlos	IR
Referenz	aktiv (LED)	passiv 2D (Papier), ggf. 2D-Barcode	-	passiv 3D (Kugeln mit Spezialfolie)
Referenz an	Decke	Entnahme-, Ablageort	-	Kommissionierer, Ablageort
Sensoren	IR-Sensor	Videokamera	Videokamera	IR-Kameras
Sensor an	Kommissionierer, Ablageort	Kommissionierer	Kommissionierer	im Raum
Hilfsmittel	-	Inertialsensor, wenn Referenz nicht im Bild	Initialisierung notwendig (über Grobtrackingsystem)	-
Anwendung	aufwendig zu installieren	für Szenario 1 und 2	noch in der Entwicklung	für Szenario 2, 3 und 4

Tabelle 6-4: Zusammenfassung der möglichen Trackingverfahren

6.4 Interaktionsgerät

Auch wenn die sprachliche Interaktion oft als beste Lösung für AR-Anwendungen genannt wird [Fri-04], werden in diesem Kapitel mehrere Geräte auf ihre Tauglichkeit für den konkreten Anwendungsfall Kommissionierung mit den in Kapitel 5.2.4 definierten Interaktionen untersucht.

6.4.1 Interaktionsgeräte für die AR-Kommissionierung

Neben der Sprachsteuerung werden noch ein Dreh-Drückknopf, ein Button in Kombination mit den Funktionstasten am Netzteil des Nomad, Armtastaturen und fingerbasierte Eingabegeräte betrachtet.

Spracheingabe

Sprache verhindert in zwischenmenschlichen Beziehungen Kommunikationsfehler [Ciu-04]. Mit der Sprache interagiert der Mensch am natürlichsten ohne dabei seine Hände zu benutzen. Die Sprachbedienung ist intuitiv und damit schnell erlernbar. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Spracheingabesystemen. Diese werden bereits für PbV eingesetzt (siehe Kapitel 2.6.2.4). Pick-by-Vision benötigt nur eine Spracheingabe, für die ein Headset und Software, die auf dem mobilen Rechner läuft, benö-

tigt werden. Das Headset ist über ein Kabel oder bei neueren Geräten über Bluetooth mit dem Controller verbunden. Die Sprachqualität ist sehr stark von der Hardware abhängig, was sich wiederum auf die Genauigkeit der Spracherkennung auswirkt [See-05b]. Sprecherabhängige Sprachsysteme sind auf eine geringe Anzahl trainierter Benutzer limitiert und erfordern ein Training am Anfang. Dies ist bei sprecherunabhängigen Systemen nicht nötig. Dafür bleiben aber individuelle Eigenheiten der Sprache unberücksichtigt. Durch Sprache kann ein System nahezu beliebig bedient werden, allerdings ist bei vielen Systemen der Wortschatz beschränkt. Systeme mit kleinem Wortschatz funktionieren sprecherunabhängig sehr gut und eignen sich für die Kommissionierung.

Die Sprachbedienung bringt eine Reihe von Restriktionen mit sich. Die Spracherkennungsqualität wird von Nebengeräuschen im Hintergrund beeinträchtigt, die trotz vielfältiger Gegenmaßnahmen nicht ganz unterdrückt werden können. Spracheingaben können beispielsweise aufgrund schlechter Aussprache oder phonetischer Ähnlichkeit der Worte (z. B. zwei und drei) nicht verstanden werden. Durch Fehlinterpretationen (nicht erkannte deutlich gesprochene Befehle, Fehlinterpretation von Umgebungsgläuschen als Befehl) oder Wiederholungen von Befehlen wird nicht nur die Kommissionierzeit erhöht, sondern dies kann auch zur Demotivation des Benutzers führen. Ein weiterer Faktor ist, dass das System nicht weiß, ob die Worte an das System oder an einen Mitmenschen gerichtet sind. Dies schränkt die Kommunikation mit den Kollegen ein. Für eine Sprachsteuerung fallen hohe Kosten für professionelle Softwaresysteme sowie industrietaugliche Headset ggf. mit Bluetooth-Anschluss an.

Dreh-/Drückknopf

Der Dreh-/Drückknopf wurde bereits im ARVIKA-Projekt für AR-Anwendungen benutzt ([Beu-04], [Fri-04]) (siehe Abbildung 6-10). Der Name gibt bereits die beiden Interaktionsmöglichkeiten wieder, nämlich das Drücken und das Drehen des Knopfes. Seine Freiheitsgrade (drehen nach links und rechts, sowie drücken entlang der Achse) lassen sich einfach auf die Benutzerschnittstelle übertragen. Mit intuitiven Drehen kann durch ein 1D-Menü navigiert oder Buchstabenreihen durchlaufen werden. Da er relativ groß und robust ist, ist die Bedienung in industriellem Umfeld ggf. mit Handschuhen möglich. Trotzdem baut er kompakt und wiegt nur 110 g. Der Benutzer muss bei der Bedienung nicht auf das Eingabegerät sehen und der Knopf lässt sich – auch in der Bewegung – einfach, schnell und zielsicher ergreifen. Den-

noch führt der Griff zum Knopf zu Zeitverlusten. Er kann einfach an der Bekleidung beispielsweise am Gürtel befestigt und über einen USB-Anschluss mit dem mobilen Rechner verbunden werden. Am Gürtel stört er nicht, wenn er nicht benötigt wird. Es ist zu beachten, dass Linkshänder das Gerät anders benutzen als Rechtshänder.



Abbildung 6-10: Dreh-/Drückknopf
[Gri-08]



Abbildung 6-11: Mini Click auf dem mobilen Rechner
des Nomad

Button und Funktionstasten

Für den Einsatz in industriellen Umgebungen eignet sich ein einfacher, großer Klickbutton wie z. B. der USB Mini Click der Fa. Tash. Bei einem Feldversuch zum Einsatz von AR in der Kommissionierung wurde dieser Button zur Quittierung benutzt [Bra-05]. Die Bewegung zum Drücken des Buttons erfolgt sehr schnell und intuitiv mit einer Hand, so dass kaum Zeitverluste anfallen. Der Button wiegt 70 g, ist kompakt, aber dennoch robust, wird über USB an den mobilen Rechner angeschlossen und auf das am Gürtel befestigte Netzteil des Nomad montiert (siehe Abbildung 6-11). Zusätzlich zum Button können die vier Funktionstasten sowie das Touchpad am Nomad für weiterführende Eingaben genutzt werden. Beim Nomad wird über die Tasten das Display eingestellt (Helligkeit, Kontrast etc.) und mit dem Touchpad eine virtuell eingeblendete Tastatur bedient. Mit den kleinen Tasten und dem Touchpad wird nur bei Bedarf interagiert, z. B. das Aufrufen und Bedienen der Menüs.

Armtastatur

Tastaturen ermöglichen die Eingabe beliebiger Informationen in Textform, die Eingabe von Befehlen sowie über die Positionstasten die Navigation in Menüs. Armtastaturen sind kleiner und leichter als herkömmliche Tastaturen, werden am Unterarm befestigt und eignen sich für die Verwendung in der Kommissionierung. Armtastaturen

wurden bereits in Projekten zum AR-Einsatz in der Kommissionierung genutzt ([Mue-05], [Tüm-08]). Diese durch herkömmliche Computeranwendungen bekannte Interaktion ist leicht zu erlernen und ganze Texte lassen sich sehr schnell und einfach eingeben.



Abbildung 6-12: Fingerscanner [Sym-08]

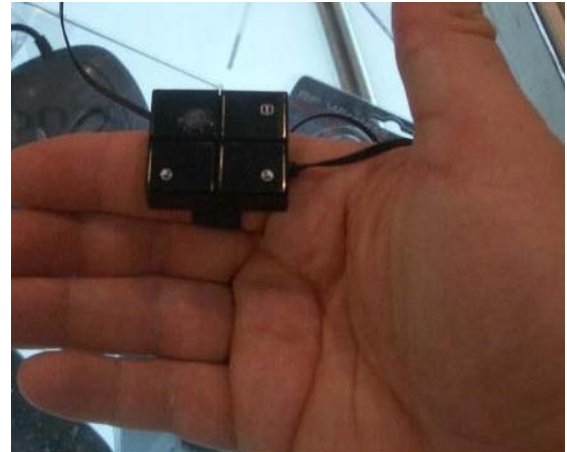


Abbildung 6-13: Ringmouse [Cio-07]

Geräte am Finger

Es gibt spezielle Geräte für den mobilen Einsatz, die über einen Handschuh oder Ring an einem Finger montiert und mit den anderen Fingern dieser Hand bedient werden. Ein Beispiel dafür ist z. B. die RingMouse der Fa. Globlink Technology (siehe Abbildung 6-12). Es sind nicht nur drei Knöpfe angebracht, sondern es können auch die Bewegungsrichtungen einer normalen Maus über den integrierten Trackball ausgeführt werden. Ein Fingerscanner (siehe Abbildung 6-13) ermöglicht ein Scannen von Barcodes ohne Hände. Mit dem Scannen kann die Entnahme quittiert werden, allerdings ist für weitere Interaktionen ein zusätzliches Eingabegerät notwendig.

6.4.2 Auswahl des Interaktionsgeräts

Beim Vergleich mit den Anforderungen erfolgt zunächst die Prüfung, ob die Geräte die benötigten Interaktionen ermöglichen (siehe Tabelle 6-5). Die Bestätigung ist mit allen möglich. Bis auf den Dreh-/Drückknopf besitzen alle Konzepte kleine Tasten, die mit Handschuhen nicht mehr bedient werden können und auf die der Benutzer bei der Bedienung sehen muss, so dass eine Navigation durch Menüs schwierig zu bewerkstelligen ist. Bis auf die Armtastatur muss für die Eingabe von alphanumerischen Zeichen bei allen Geräten ein Interaktionskonzept entwickelt werden. Alle Ge-

räte kann der Kommissionierer mitnehmen und in Bewegung bedienen. Ohne einen Einsatz der Hände kommt nur die Sprachsteuerung aus, während bei der Armtastatur für die Interaktionen beide Hände bzw. ein Arm und die andere Hand benötigt werden. Bei den auf den Finger montierten Geräten und der Armtastatur sind Probleme hinsichtlich des Arbeitsschutzes zu erwarten, weil die Geräte beim Griff in enge Lagerfächer mit dem Regal kollidieren oder sich verhaken können. Armtastaturen werden in der Praxis beschädigt, weil das Gerät z. B. beim Griff ins Regal gegen die Regalaufbauten geschlagen wird. Dazu muss noch ein Kabel vom Handgelenk bis zum mobilen Rechner verlegt werden. Die meisten Geräte lassen sich einfach an den mobilen Rechner anschließen und in eine Windows-Anwendung integrieren. Dies ist der große Nachteil der Sprachsteuerung, denn diese muss komplett neu implementiert werden. Deshalb – und aufgrund der hohen Kosten für eine industrietaugliche Software – wird eine Sprachsteuerung nicht verwendet, sondern ein in AR-Anwendungen bewährter Dreh-/Drückknopf.

Kriterium \ Gerät	Bestätigung	Menünavigation	Texteingabe	Hände frei	Handschuhe	Arbeitsschutz/Ergonomie	Integration
Spracheingabe	+	+	-	++	++	++	--
Dreh-/Drückknopf	++	++	-	-	++	+	+
Button/ Funktionstasten	++	--	--	-	o	+	+
Armtastatur	+	-	++	--	--	o	++
Geräte am Finger	+	-	--	o	-	--	+

Tabelle 6-5: Bewertung der Eingabegeräte hinsichtlich der Anforderungen

6.5 Interaktionskonzept

Die Auswahl der Hardwarekomponenten ermöglicht nun die Gestaltung eines genau abgestimmten Interaktionskonzepts. Zunächst gilt es, die benötigten Daten spezifisch über das Nomad bereitzustellen. Anschließend wird ein Interaktionskonzept unter Einsatz des Dreh-/Drückknopfes erstellt.

6.5.1 Benutzeroberfläche

Die Informationsbereitstellung ist einer der wichtigsten Faktoren in der Kommissionierung, denn die Vollständigkeit, Lesbarkeit und Anordnung der Informationen haben einen großen Einfluss auf die Totzeit und Fehlerquote und damit auf Kosten, Qualität und Leistung des Kommissionierers [Gud-05]. Um eine Überfrachtung mit Informationen und daraus entstehende Fehler zu vermeiden, sollen sie den Mitarbeitern zur Verfügung gestellt werden, wenn sie diese brauchen [Ohn-93]. In der Kommissionierung ist bereits eine optimale GUI-Gestaltung für stationäre und mobile Displays gefordert [Jün-00]. Es ist allerdings ein Paradigmenwechsel vom Arbeitssystem Bildschirmarbeitsplatz hin zur Datenbrille nötig. Deshalb werden zunächst wichtige Aspekte der GUI-Gestaltung erwähnt, bevor diese für das Nomad spezifiziert werden. Nach dem Aufstellen der Richtlinien wird die GUI für Pick-by-Vision vorgestellt. Es wird dabei vor allem auf die GUI-Gestaltung und nur am Rande auf die technische Umsetzung eingegangen.

6.5.1.1 Allgemeine Regeln für die GUI-Gestaltung mit AR

Für die Gestaltung der Benutzerschnittstelle mit AR sind weder ausreichendes Expertenwissen noch speziellen Vorgaben vorhanden, Normen für Darstellungsformen wie z. B. die DIN EN ISO 9241, die EU-Richtlinie 90/270/EWG oder die DIN EN ISO 13407 für den benutzerzentrierten Gestaltungsprozess können für die Visualisierung mit AR herangezogen werden ([DIN9241], [EU90270], [DIN13407]). Im Rahmen von ARVIKA wurden Gestaltungsrichtlinien für AR für verschiedene Aus- und Eingabegeräte erarbeitet ([Beu-04], [Oeh-04]). Die bei herkömmlichen Bildschirmarbeitsplätzen gewonnenen Erfahrungen können nicht ohne Weiteres auf Datenbrillen übertragen werden. Beispielsweise ändern sich bei mobilen Systemen ständig die Lichtverhältnisse und der Kontrast. Das Erfassen von Informationen über ein HMD ist immer noch Forschungsgegenstand, aber es lassen sich generelle Aussagen treffen. AR-Anwendungen werden in Systeme ständiger, zeitweiser und vereinzelter Unterstützung eingeteilt. Untersuchungen verdeutlichen, dass die Benutzer nicht permanent virtuelle Daten im Gesichtsfeld angezeigt haben wollen [Beu-04]. Deshalb sind eine „Ausblend“-Taste sowie eine kontextabhängige Einblendung nötig, d. h. der Benutzer bekommt nur die Daten visualisiert, die er gerade braucht. Dies ist abhängig von der Qualifikation des Benutzers, dem Arbeitsprozess oder der geforderten Konzentration

auf reale oder virtuelle Objekte [Alt-03]. Ein Überladen der Szene mit virtuellen Informationen (Cluttering) ist zu vermeiden, indem nur die wichtigen Informationen (stets) sichtbar sind und das FoVD maximal zu 40 bis 50 % belegt ist. Alle Daten, die nicht ständig zur Verfügung stehen müssen, können als Annotationsdaten dargestellt werden. Annotationsdaten erscheinen erst durch das Ausführen einer Interaktion. So wird das Blickfeld des Kommissionierers nicht mit virtuellen Daten überladen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass Benutzer größere Informationsmengen über ein HMD aufnehmen, weil dies zuviel Aufmerksamkeit von der realen Umgebung nimmt [Oeh-04]. Die Aufnahme der realen Informationen soll nicht durch virtuelle Objekte behindert werden. Es ist zudem zu beachten, dass ein HMD nur ein eingeschränktes FoVD und somit wenig Platz für das Einblenden der virtuellen Informationen hat.

6.5.1.2 GUI-Gestaltung für das Nomad

In diesem Kapitel werden wichtige Aspekte für die GUI-Gestaltung mit dem monokularen und monochromen Nomad erläutert. Für VRDs existiert sehr wenig Arbeit im Kontext von 3D UI Design [Bow-05], deshalb wird sich an den Gestaltungsrichtlinien aus dem ARVIKA-Projekt orientiert ([Beu-04], [Oeh-04]).

Displayeinteilung und Anordnung

An den Randbereichen ist das Bild bei VRDs unscharf und verzerrt, weshalb das Field of Regard als Anzeigebereich definiert wird [Bow-05]. Die Ausführungszeiten für Operationen, die in der Mitte des Bildschirms erfolgen, sind aufgrund der geringeren Suchzeit kleiner als für die am Rand [Wie-04]. Informationen müssen sehr prägnant und strukturiert dargestellt werden. Eine Strukturierung ist durch die Ausrichtung an einem virtuellen Gitter, eine Gruppierung zusammenhängender Informationen und Abstände bzw. sparsam eingesetzte Trennstriche zu erreichen. Die virtuelle Information darf die Aufmerksamkeit nicht von der realen Umgebung ablenken. Bei den Darstellungsgrößen der virtuellen Informationen ist das Spannungsfeld zwischen zu klein und zu groß zu beachten. Kleine Informationen sind schlecht lesbar und bedingen Fehler, während große zu viel von der realen Welt verdecken, was den Arbeitsschutz gefährden kann. Abbildung 6-14 zeigt die generelle Einteilung der Darstellung mit einem VRD in eine Basisnavigation am oberen Bildrand und den Inhalt (Content Panel). Die Basisnavigation kann noch in eine Kopfzeile zum Inhalt (Header Panel) und

eine Funktionsleiste (Funktion Panel) unterteilt werden. Es soll immer möglich sein, mit einem Knopfdruck (Home) zurück zu dieser Basisnavigation zu kommen.



Abbildung 6-14: Generelle Aufteilung der Daten in Inhalt und Navigation bei der Darstellung mit einem HMD [Beu-04]

Darstellung von statischen Daten

Für den Anwendungsfall Kommissionierung müssen statische Text- oder Bildinformationen sowie dynamische 3D-Objekte eingeblendet werden. Da es keine allgemeingültigen Gestaltungsregeln hinsichtlich der Darstellungsgröße gibt, muss dies für jedes HMD individuell angepasst werden. Eventuell lassen sich Regeln für HMDs mit gleichen Klassifizierungsmerkmalen (z. B. binokular, LCD, Auflösung) ableiten [Oeh-04]. Bei der Darstellung der Textinformationen sind aus Sicht der Kommissionierung einige Aspekte zu beachten ([VDI3311], [Vog-97]):

- Informationsinhalt kurz und klar halten (nur Orts- und Mengenangaben)
- Einhalten der erforderlichen Schriftgröße sowie Verwendung einer gut lesbaren Schriftart
- Zahlen und Buchstaben trennen (z. B. durch Leerzeichen oder Bindestrich)
- Lagerortverschlüsselung kurz alphanumerisch, logisch und gleichartig in allen Zonen
- Identifikationsmerkmale kurz fassen

- grafische Unterscheidbarkeit einzelner Positionen (z. B. unterschiedliche Farben der Zeilen)
- direkte Arbeitsanweisungen in großer Schrift, immer am gleichen Ort und abgesetzt von Zusatzinformationen anzeigen

Das Nomad besitzt die Möglichkeit, die virtuelle Objektebenen von 30 cm bis unendlich einzustellen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird mit einer konstanten virtuellen Objektebene von 50 cm gearbeitet, die für die Kommissionierung in ca. 1 m breiten Regalgassen dem Abstand zwischen dem Auge und den Regalen entspricht. Mit dieser Annahme und einem üblichen bevorzugten Sehwinkel zwischen 20' und 22' kann die Zeichenhöhe aus der Norm für Bildschirmarbeitsplätze ermittelt werden [Alt-03] (siehe Formel 6-1).

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

Formel 6-1: Berechnung der erforderlichen Zeichenhöhe ([DIN9241] Teil 3)

Für einen Sehwinkel von 20' beträgt die Mindestschriftgröße damit 3 mm. Wird eine größere Darstellungsgröße gewählt, sind die Informationen besser zu lesen, aber es wird auch mehr von der Realität verdeckt. Optimal sind zwei Schriftgrößen für die Haupt- und die Zusatzinformationen [Oeh-04]. Die Darstellungsgrößenwahl ist wichtig, um eine möglichst ermüdungsfreie Informationsaufnahme zu gewährleisten. Hauptinformationen sind in der empfohlenen und Zusatzinformationen in der mindest erforderlichen Darstellungsgröße anzuzeigen. Die Zeilenbreite soll in HMDs 60 Zeichen nicht überschreiten. Längere Textpassagen sollten trotzdem vermieden werden (maximal zwei Sätze).

Darstellung von dynamischen 3D-Objekten

Text wird neben virtuellen Grafiken oder Icons nicht wahrgenommen, deren Einsatz aber gut überlegt erfolgen sollte, weil sie die reale Welt verdecken. Um die Verdeckung durch virtuelle Informationen gering zu halten, sind einfache, nicht gefüllte Objekte – so genannte Primitivgrafiken (Kreise, Pfeile statt ausmodellerte 3D-Formen) – mit dünnen Strichen zu verwenden [Oeh-04]. In Anlehnung an die Norm für Bildschirmarbeitsplätze lässt sich auch eine optimale Strichstärke berechnen [Alt-03] (siehe Formel 6-2), die zwischen 0,25 und 0,5 mm liegen sollte.

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

Formel 6-2: Berechnung der erforderlichen Strichbreite (nach [DIN9241] Teil 3)

Nach Möglichkeit sind Animationen einzubauen, weil diese durch ihre zeitlichen und örtlichen Kontraste schneller entdeckt werden und somit die menschliche Informationsverarbeitung schneller in Gang gesetzt wird ([Alt-03], [Oeh-04]). Der Einsatz von Farben ist beim monochromen Nomad nur eingeschränkt über Rotstufen möglich.

6.5.1.3 Metapher zur Blickführung

Da das FoVD von HMDs klein ist, sieht der Mitarbeiter die virtuellen Objekte nur in einem beschränkten Bereich. Deswegen ist eine Metavisualisierung notwendig, die Kopfbewegung bzw. die Blickrichtung des Benutzers zu steuern, wenn die virtuellen Daten nicht im Blickfeld sind. Beim Nomad beträgt das monokulare FoVD 23° horizontal mal 17,25° vertikal. Bei den statischen Daten, die an einer festen Position im FoVD des Benutzers visualisiert werden, ist keine Blickführung nötig. Bei Daten, die eine relative Position zu Objekten, z. B. Lagerfächern, oder eine feste Position im Raum haben, ist eine Blickführung notwendig.

Die Blickführung kann mit einem 2D-Kompasspfeil erfolgen. Obwohl diese Metapher aus der Realität bekannt ist, ist sie für die Anzeige über Datenbrillen nicht geeignet. Der „Kompass“ liegt nicht in der Hand, sondern steht aufrecht im FoVD, so dass ein Umdenken nötig ist. Das Bild des Kompasses muss um 90° in die Ebene hineingedreht werden, damit die Richtungen wieder mit den realen Himmelsrichtungen übereinstimmen. Diese Metapher wurde zunächst auch bei der Bolzenschweißpistole verwendet (siehe Kapitel 3.3.3), aber dann durch eine „Gummiband“-Metapher ersetzt [Ech-04]. Diese Metapher setzte das FAR auch bei Voruntersuchungen zur Visualisierung mit dem Nomad ein [ScB-08] (siehe Abbildung 6-15). Das Gummiband beginnt vor dem Auge des Benutzers und zeigt in Richtung des nächsten Lagerfaches. Die Visualisierung besteht aus einem virtuellen Strich, dem Gummiband, und einem Pfeil in ca. 30 cm vor dem Benutzer. Folgt der Benutzer durch Kopf- oder Körperbewegungen dem Gummiband bzw. dem Pfeil, wird er zur nächsten virtuellen Information geführt (z. B. einem weiteren Pfeil auf das aktuelle Lagerfach). Mit einem Pfeil ist die Richtung ohne großen kognitiven Aufwand sofort ersichtlich, allerdings sind keine Informationen zu Distanzen enthalten.

Als weitere Metapher wurde ein Tunnel in Anlehnung an den für schnelle Suchaufgaben geeigneten „Attention Funnel“ getestet [Bio-06]. Der Tunnel besteht aus Quadraten oder Kreisen, die entlang einer am Auge beginnenden Kurve angeordnet sind und somit das kopfzentrierte Koordinatensystem des Benutzers mit dem objektzentrierten Koordinatensystem des Lagerfachs verbindet (siehe Abbildung 6-16). Das letzte Element ist vor dem Lagerfach. Der Benutzer folgt diesem Tunnel intuitiv. Die 3D-Information (Tiefenwahrnehmung) wird trotz der monokularen Visualisierung gut wiedergegeben. Allerdings ist es am Anfang schwierig die richtige Richtung zu finden. Der Benutzer entwickelt schnell ein Richtungsempfinden und bevorzugt den Tunnel zur Wegfindung, u. a. weil er ein Gefühl für die Distanz und damit die Tiefe wiedergibt. Nachteilig ist allerdings, dass das FoVD zu sehr mit virtuellen Informationen überfüllt ist [ScB-08]. Beim Aufbau des Tunnels kann die Geometrie, aus der sich der Tunnel zusammensetzt, die Anzahl der Elemente, die Kurve oder auch die Transparenz der Objekte variieren. Wird die Transparenz der Objekte erhöht und die Dicke verringert, ist das FoVD weniger überlastet und die Probanden fanden leichter ihr Ziel.

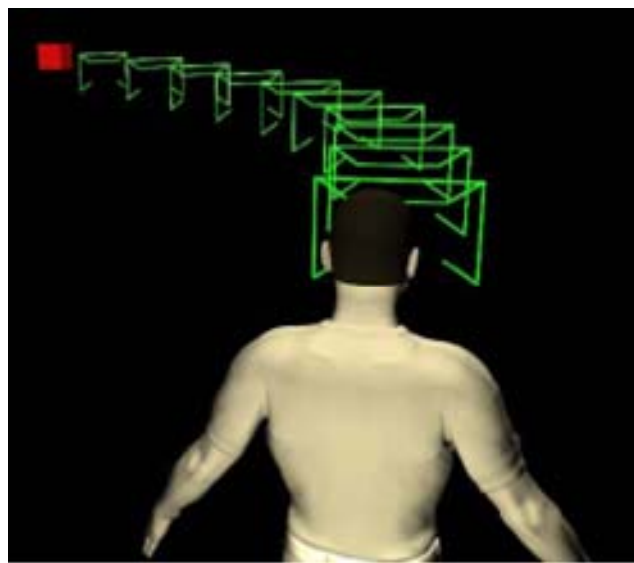
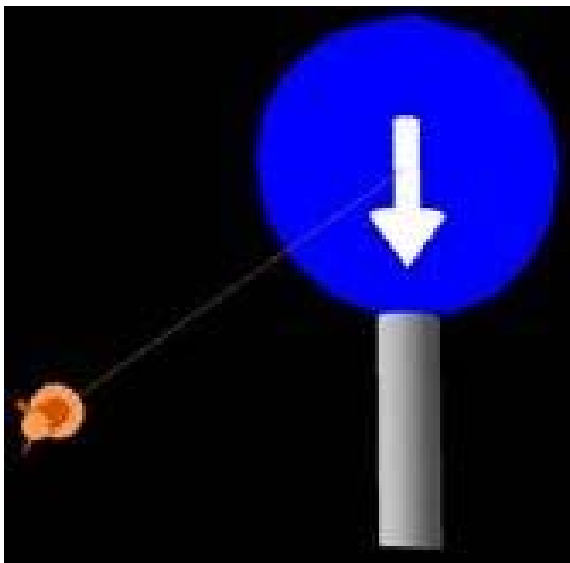


Abbildung 6-15: „Gummiband“-Metapher mit Pfeil [ScB-07a] Abbildung 6-16: Tunnel zur Blickführung [Bio-06]

6.5.1.4 Metapher zur Wegfindung

Die Blickführung kann eng mit der Wegfindung verknüpft sein. Für die Wegfindung gibt es zwei generelle Sichtweisen. Der Benutzer kann im Zentrum der Visualisierung

stehen (egozentrisch, Sichtweise aus 1. Person) oder diese hängt an einem Objekt oder am Welt-COS (exozentrisch, Blickpunkt 3. Person) [Bow-05]. Egozentrische Formen sind die „Gummiband“-Metapher oder der Tunnel, denen der Benutzer folgt. Mächtige exozentrische Verfahren sind Karten (Draufsicht auf Lagerbereich) (siehe Abbildung 6-17). Der exozentrische Blick muss mit dem egozentrischen Blick des Benutzers zusammengebracht werden, d. h., dass der Benutzer weiß, wo er sich auf der Karte befindet und so einen Bezug zur Realität (z. B. Orientierung) herstellen kann. In Abhängigkeit des Einsatzes eines Trackingsystems lassen sich statische und dynamische Karten unterscheiden, deren grafische Darstellungsweise für den abzuarbeitenden Kommissionierauftrag variieren kann [Gün-09]. Lagerskizzen sind bei Kommissionieranwendungen mit AR bereits getestet worden. Sie sind v. a. bei großen Lagerbereichen mit klar identifizierbaren Artikeln sinnvoll und 60 % der Probanden sehen in ihr den Hauptvorteil des Systems mit Datenbrille (Beschreibung in Textform 35 %, AR mit 20 %) [Mue-05]. In anderen Untersuchungen zeigte sich, dass die 2D-Karte ständig beobachtet werden muss [ScB-07]. Ein weiterer Nachteil ist, dass übersichtliche Karten relativ groß sind und nicht einen unerheblichen Teil des FoVD verdecken. Bei der Wegfindung existieren individuell unterschiedliche Präferenzen, so dass sie an die Fertigkeit bzw. das Können oder auch an das Wissen des Benutzers anpassbar sein sollte [Bow-05].

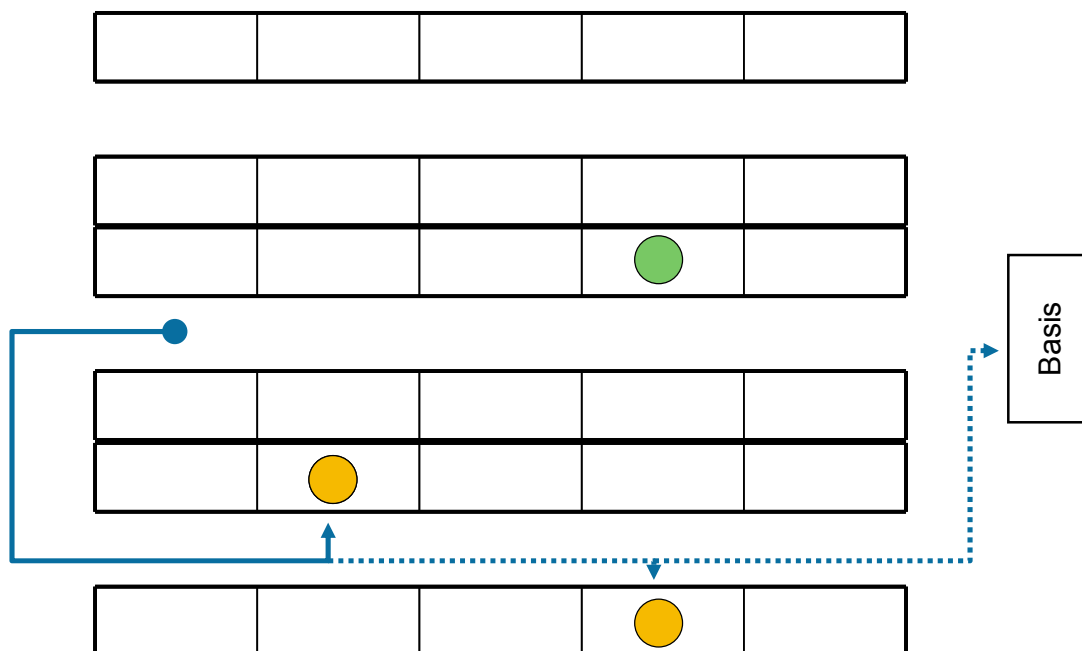


Abbildung 6-17: 2D-Karte mit allen Positionen, farblich nach Bearbeitungsstatus gekennzeichnet, sowie dem Weg durch das Lager

6.5.1.5 Metapher zur Lagerfachfindung

AR bietet die Möglichkeit das Lagerfach optisch hervorzuheben. Neben 2D-Karten (Vorderansicht des Regals) lassen sich ein Rahmen oder ein Pfeil zur Markierung des Lagerfachs nutzen. Bei der Karte werden die Felder abgezählt und somit auf eine 1D-Information zurückgerechnet [ScB-07]. Der Pfeil zeigt auf oder sogar in das Lagerfach, wozu aus manchen Blickwinkeln eine Verdeckung durch das LHM der aktuellen Position oder benachbarte LHM nötig ist. Soll der Rahmen um ein LHM, z. B. einen Sichtlagerkasten, angezeigt werden, sind die LHM ebenfalls als Verdeckungsgeometrie zu hinterlegen. Durch die Verdeckung kann auch bei einem monokularen System ein Tiefeneindruck erreicht werden. Allerdings steigt die Komplexität der Visualisierung und es muss gewährleistet sein, dass die LHM an einer fixen Position stehen. Bei der Ablage sind die Kommissionierbehälter auf dem Kommissionierwagen an einer festen Stelle, so dass der Pfeil in bzw. der Rahmen um den Behälter (inkl. Verdeckung) angezeigt werden kann.

6.5.1.6 Bewertung der Visualisierungen

Bei den verschiedenen Untersuchungen der AR-Kommissionierung wurden verschiedenste Visualisierungen eingesetzt. Eine Übersicht und eine Bewertung der bisherigen Untersuchungen ist in Tabelle 6-6 zusammengefasst.

	Blick	Weg	Fach	Einsatz	Vorteile	Nachteile
Pfeil	+	+	-	[ScB-07b]	intuitiv	keine Distanz-, Tiefeninformationen, bei Entnahme Occlusion
Kompass	o	o	/	[Tüm-08]	intuitiv	Umdenken erforderlich
2D-Karte	/	o	-	[Dan-05], [Mue-05], [ScB-07b]	intuitiv, Überblick	Verdeckung FoVD, bei Entnahme Abzählen, bei Weg ständiges Beobachten nötig
Gummiband	+	/	/	[ScB-07b], [ScB-08]	geringe Verdeckung FoVD	Kombination mit anderer Geometrie nötig
Schilder	/	o	/	[ScB-07b]		Kombination mit anderer Geometrie nötig
Tunnel	+	o	o	[ScB-08]	Distanz-, Tiefeninformation, bevorzugt bei Wegfindung	Orientierung am Anfang, Verdeckung FoVD
Rahmen	/	-	+	[Alt-03], [Dan-05], [Mue-05], [Tüm-08]	bevorzugt bei Lagerfachfindung	Verdeckungsgeometrie notwendig
nur Text	/	o	o	[Bra-05], [Kam-06], [FrL-06], [ReR-08]	kein Tracking notwendig	kein direkter Bezug zur Umgebung

Tabelle 6-6: Zusammenfassung der verschiedenen Visualisierungen in bisherigen Untersuchungen zur AR-Kommissionierung

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden am FAR eine weitere Benutzerstudie unterschiedliche Visualisierungen für die Kommissionierung durchgeführt [ScB-08]:

- Gummiband-Metapher mit einem Rahmen um das Lagerfach
- Tunnel aus Rechtecken ohne Transparenz mit Rahmen
- Tunnel aus Rechtecken mit Transparenz, sobald der Rahmen sichtbar ist
- Tunnel aus Kreisen mit Transparenz, sobald der Rahmen sichtbar ist

Der Rahmen kristallisierte sich bereits bei vorhergehenden Untersuchungen als beste Lösung für die Lagerfachfindungen, weil er schneller und weniger fehleranfällig war wie der Pfeil. Bei der Wegfindung gibt der Pfeil sofort die Richtung vor, vermittelt aber keine Informationen zur Distanz. Die Probanden mit dem Tunnel ohne Transparenz arbeiteten am langsamsten, weil das Bild überfüllt und der Rahmen kaum sichtbar war. Beim Tunnel aus Kreisen war es einfacher, diesen vom Rahmen am Ende zu unterscheiden. Obwohl beim Tunnel etwas Eingewöhnungszeit nötig ist, bevorzugten ihn die Probanden für die Wegfindung.

6.5.2 Interaktionskonzept

Aus den vorgestellten Visualisierungen und den ausgewählten Hardwarekomponenten wird nun ein Interaktionskonzept erstellt, bei dem der Kommissionierer intuitiv und ohne Unterbrechung seines natürlichen Bewegungsablaufs die Informationen ablesen und mit dem System interagieren kann.

Zunächst ist das Bezugssystem für die Daten festzulegen. Während die statischen Daten immer im selben Ort des FoVD zu lesen sein sollen, ist ihre relative Position zum Benutzer-COS konstant. Die 3D-Objekte zur Wegfindung und zur Entnahmeunterstützung beziehen sich auf die Lagereinrichtung, die im Welt-COS festgelegt ist. Die virtuelle Ablageunterstützung bezieht sich auf den Kommissionierwagen und dessen Objekt-COS.

Das FoVD ist in drei Teile geteilt: in die durch einen Strich abgegrenzte Basisnavigation oben, eine Liste mit den möglichen Befehlen unten und dazwischen den Inhaltsbereich (siehe Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19). Der Login und die Auftragsauswahl erfolgt mit 1D-Menüs inklusive einer Bestätigung, die intuitiv mit dem Dreh-/Drückknopf bedient werden können. Bei der Aufnahme der Sammelbehälter wird der

Kommissionierer über Textanweisungen geführt, wohin er die entsprechenden Behälter auf den Kommissionierwagen stellen muss. Der Abstellort kann zusätzlich optisch hervorgehoben werden.

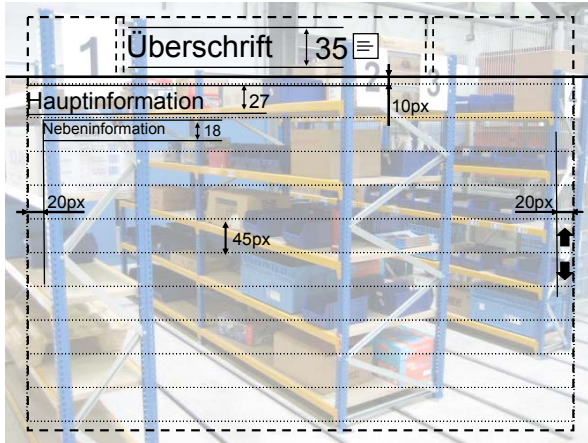


Abbildung 6-18: GUI Einteilung des FoVD



Abbildung 6-19: Mögliche GUI (nur Textinformationen) während der Entnahme

In der Funktionsleiste sind ein Button für die Bestätigung und einer für die Rückkehr zum Hauptmenü gegeben, zwischen denen durch Drehen gewechselt wird. Nach der Bestätigung der Aufnahme aller Sammelbehälter wird der Kommissionierer zur ersten Position geführt. Auf die Anzeige von Bildern und Karten wird verzichtet. Der Effekt der Verdeckung des FoVD würde durch die Kombination mit dynamischen 3D-Objekten weiter verstärkt. Für die grobe Wegfindung, d. h. bis in die Gasse, werden Textinformationen verwendet, denn diese ist für den Kommissionierer auch ohne dynamische AR-Unterstützung zu bewerkstelligen [Gün-09]. Die Blickführung und Wegfindung in der Gasse erfolgt mit einem Tunnel aus Kreisen, die transparent werden, sobald das Lagerfach im Blickfeld ist. Der Entnahmeort wird durch einen Rahmen, der nicht um das gesamte Lagerfach, sondern um die Lagerfachbeschriftung angezeigt wird, hervorgehoben. Dies hat drei Vorteile:

- Die Lagerfachbeschriftung hat einen festen Ort, nämlich mittig unter dem Lagerfach.
- Der Rahmen erscheint eher komplett im FoVD als der viel größere Rahmen um das gesamte Lagerfach, der im Nahbereich nicht mehr vollständig darstellbar ist.
- Es muss nur eine Verdeckungsgeometrie für die Regale und nicht für den Lagerinhalt erstellt werden.

Der Tunnel ist zusätzlich animiert, d. h. vom Auge zum Lagerfach blinken die einzelnen Elemente nacheinander immer auf, um die Blickrichtung dem Tunnel folgen zu lassen. Diese Visualisierung wird auch für die Palettenstellplätze benutzt. Der Rahmen ist auf der Palette selbst und damit in Bodennähe platziert.

In der Funktionsleiste findet sich drei Buttons: einer für die Bestätigung, einer, um das Fehlermenü aufzurufen und einer, um die Aktion rückgängig zu machen. Tritt bei der Kommissionierung ein Mengenfehler auf, wird das Fehlermenü aufgerufen. In einem 1D-Menü können sämtliche Fehlerarten hinterlegt sein. In dieser Arbeit werden nur Mengenfehler betrachtet, d. h. der Kommissionierer kann nach der Auswahl des Mengenfehlers über ein 1D-Menü aus Zahlen die tatsächlich entnommene Menge eingeben. Nach der ersten Quittierung wird der Ablageort, d. h. bei der konventionellen Kommissionierung der Sammelbehälter, durch einen Rahmen hervorgehoben. Als Benutzereingaben stehen der Button für die Quittierung und der „Zurück“-Button zur Verfügung. Dieser Ablauf wird iterativ durchlaufen, bis alle parallel bearbeiteten Aufträge zu Ende sind. Nach Beendigung des letzten Auftrags wird dem Kommissionierer angezeigt, dass er zum Abgabepplatz gehen soll. Die Abgabe kann ebenfalls mit AR unterstützt werden. Dies wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Neben visuellen Zusatzinformationen im HMD wirkt sich eine zusätzliche akustische Unterstützung positiv aus ([Beu-04], [Wie-04]), so dass ein akustisches Feedback integriert wurde. Bei jedem Druck ertönt ein Hinweiston und das Drehen wird durch ein Klicken unterstützt, sobald der Cursor die Position wechselt (z. B. im 1D-Menü oder zwischen den Buttons in der Funktionsleiste).

6.6 Systemaufbau

Das Pick-by-Vision-System besteht aus den drei Komponenten Tracking-, Visualisierungs- und Interaktionssystem. Den Hardwareaufbau zeigt Abbildung 6-20. Aufgrund des kleinen Abdeckungsbereichs in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml wurde ein outside-in IR-Tracking gewählt, weil es sehr robust und genau auch in industriellen Umgebungen ist. Es lassen sich zwei Arten von IR-Trackingkameras einsetzen. Ein System verfügt über weitwinkligen Kameras über dem Regalaufbau mit einer Update rate von maximal 30 Hz, deren Bilder am Trackingrechner vor der Weiterleitung der Daten zum Server ausgewertet werden. Im zweiten Fall werden Kameras am Gas-

senende und über dem Regalaufbau platziert (siehe Abbildung 6-21). Deren Öffnungswinkel ist kleiner, aber die Updaterate beträgt 60 Hz. Diese Kameras besitzen eigene Prozessoren, werten das jeweilige 2D-Bild aus und schicken die Daten zum Trackingserver. Beide Trackingvarianten schicken das gleiche Telegramm über WLAN an den mobilen Rechner am Kommissionierer, so dass das Trackingsystem leicht ausgetauscht werden kann. Die Rechenleistung ist somit auf den Trackingrechner (Auswertung Trackingdaten) und den mobilen Rechner (Visualisierung) verteilt. Der Kommissionierer trägt den mobilen Rechner in einem Rucksack mit sich. Das Netzteil der Datenbrille ist über den VGA-Ausgang mit dem Rechner verbunden und wird am Gürtel getragen. Auf dieses Netzteil ist der Dreh-/Drückknopf montiert, dessen Eingaben über USB an den Rechner weitergeleitet werden. Bei der Datenbrille wurde ein stabiler Systemträger gewählt, so dass die Position des auf ihr montierten Targets zur Optik des HMDs stabil bleibt (siehe Abbildung 6-21). Außerdem galt es die virtuellen Daten optimal zum menschlichen Auge auszurichten. Dazu erfolgte die Ermittlung der Position des Targets zur Datenbrille und deren Hinterlegung im System sowie eine SPAAM-Kalibrierung am Nomad selbst (siehe Kapitel 6.2.2).

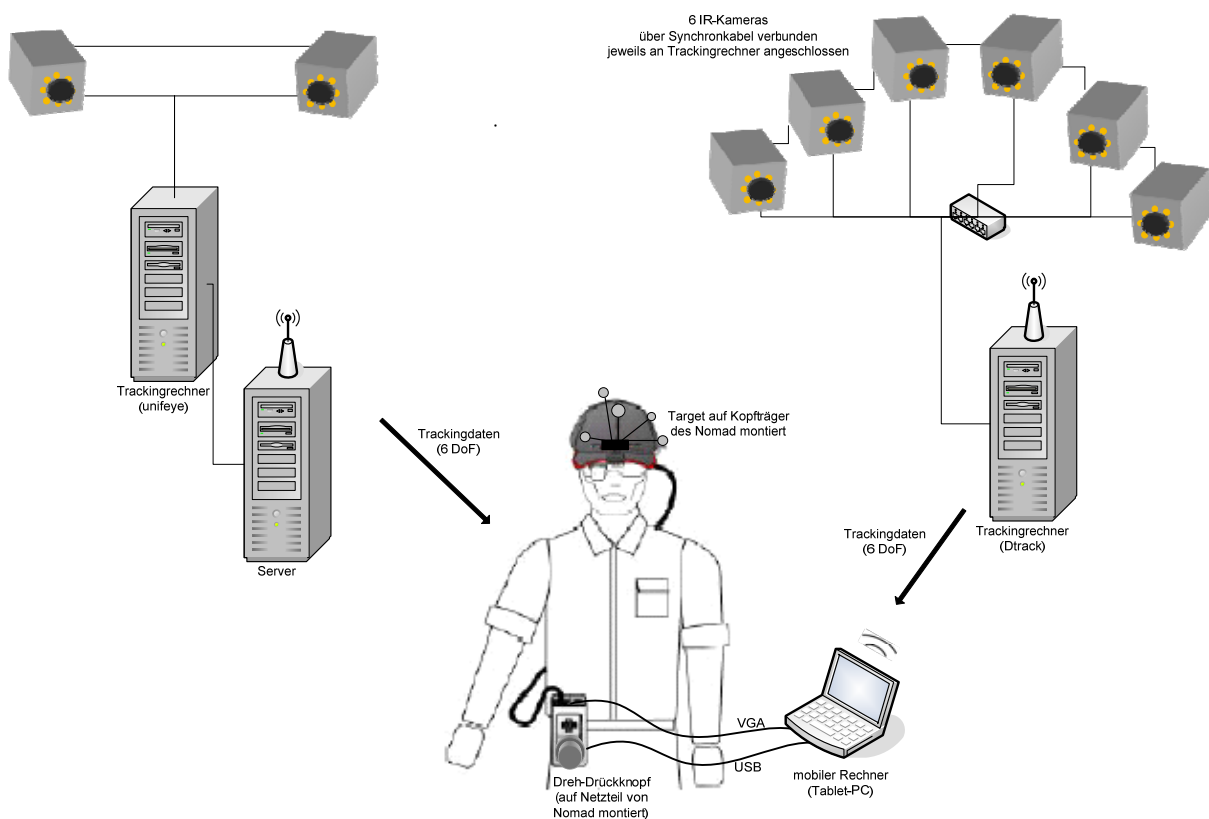


Abbildung 6-20: Hardwareaufbau mit den beiden möglichen Trackingtechnologien

Die Konfiguration des Systems erfolgt über mehrere XML-Dateien. Es wurde keine Anbindung an ein WMS realisiert, so dass der Lagerinhalt und die Aufträge in einer Datei zusammengefasst sind. Der Lageraufbau, d. h. die Anzahl, Größe und Position der Regale und der Lagerfächer müssen ebenfalls definiert werden. Zum einen ist dies wichtig, damit die 3D-Geometrie zur Hervorhebung des Lagerplatzes räumlich richtig positioniert werden kann, zum anderen dient dies als Verdeckungsgeometrie, d. h. dass eine Verdeckung von virtuellen Objekten durch reale Objekte realisiert werden kann. Das System ermöglicht die Anzeige unterschiedlichster 3D-Geometrien zur Wegfindung, Blickführung und zur Unterstützung des Greifvorgangs, wie beispielsweise Pfeile, Rahmen oder den Tunnel. Diese Geometrien lassen sich in einer eigenen Datei konfigurieren. Sie können ein- und ausgeschaltet, ihre Größe oder Form variiert sowie ihre räumliche Position im Bezug zum Benutzer oder dem Welt-COS definiert werden. Über diese Dateien erfolgen eine schnelle Änderung des Systems und eine Anpassung an die jeweiligen Randbedingungen.



Abbildung 6-21: Trackingkameras über dem Lagerbereich

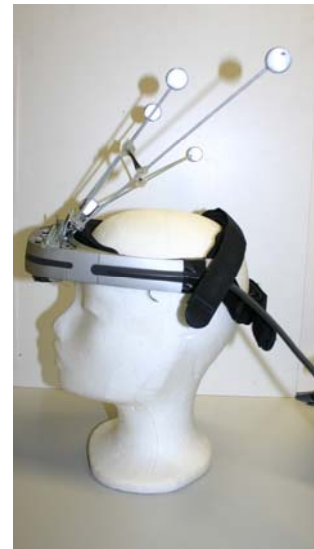


Abbildung 6-22: HMD mit Trackingkugeln

7 Evaluierung in einem Labortest

In der Versuchshalle des Lehrstuhls fml erfolgte die Evaluierung des Pick-by-Vision-Systems anhand eines Probandenprogramms. Der Labortest beinhaltet einen Vergleich je eines Systems mit Tracking und ohne Tracking sowie eines Systems mit Papierliste als Referenz⁴³. Nach Voruntersuchungen ließ sich eine für diesen Anwendungsfall optimale Visualisierung festlegen. Im Labortest wurden logistische Leistungskennzahlen ebenso gemessen wie subjektive Beanspruchungskriterien, deren Auswertung anschließend mit statistischen Mitteln erfolgte.

7.1 Voruntersuchungen

Zu Beginn dieses Kapitels wird erläutert, warum Labortests Feldstudien in diesem Entwicklungsstadium einer Technologie vorzuziehen sind. Außerdem wird kurz das Usability Testing als Voruntersuchung zum Labortest erklärt.

7.1.1 Feldstudien vs. Laboruntersuchungen

Feldstudien oder Praxistests, bei denen Daten im Unternehmen gewonnen werden, stellen die beste Grundlage zur Bewertung von neuen Technologien dar. Sie sind aber die aufwändigste Art, Daten zu sammeln. Datenaufnahmen im Unternehmen sind praxisnah, aber vor allem im Bereich der Kommissionierung schwer vergleichbar (unterschiedliche Kommissioniersysteme, technische Hilfsmittel, Auftrags- und Artikelstruktur). Im Labor sind die Wegzeiten kurz und die Konzentration liegt auf der Identifikation und Entnahme. Die hohe geforderte Konzentration führt zu einer höheren mentalen Belastung als in der Praxis, wo eine mentale Entspannung (Wege, Leerbehälter, Umverpackungen entfernen) möglich ist [Lol-03]. Laborversuche erlauben die Betrachtung und den Vergleich einzelner Einflussgrößen, deren Ausprägungen während der Versuche geändert werden können, während die Randbedingungen gleich bleiben. Der Nachteil einer Laborstudie ist, dass die kontrollierten Bedingungen die externe Validität mindern. Damit wird die Generalisierbarkeit der Ergeb-

⁴³ PL: Papierliste, mTr: Pick-by-Vision mit Tracking, oTr: Pick-by-Vision ohne Tracking

nisse bezeichnet, also ihre Übertragbarkeit auf andere Personen und Situationen bzw. auf die praktische Anwendung. Dies gilt insbesondere für die psychische Belastung und Beanspruchung, welche durch viele weitere Faktoren (z. B. Arbeitsumgebung) beeinflusst wird [FrL-06]. Vor Feldversuchen in der Industrie müssen geeignete Laboruntersuchungen stattfinden, um grundlegende Fragestellungen zu bearbeiten, ohne den regulären Arbeitsbetrieb zu stören, z. B. Untersuchungen der Beanspruchung von AR [Tüm-08].

7.1.2 Usability Testing

Ein Usability Testing wird als Voruntersuchung mit Experten durchgeführt. Bereits sechs Experten entdecken die meisten Fehler und jeder weitere Experte bestätigt im Wesentlichen die Fehler [Nie-97]. Dieses Verfahren ermöglicht es, schnell Aussagen zu einer Entwicklung zu bekommen und eignet sich auch in der Industrie, Bewertungen durch Mitarbeiter durchzuführen, ohne deren Arbeitszeit groß zu beanspruchen. Die Evaluation erfolgt mit Verfahren wie „lautes Denken“ (Gedanken beim Test aussprechen), „Befragung“, „strukturiertes Interview“ und „Beobachtung“. Die Ergebnisse haben keinen Anspruch auf statistisch abgesicherte Aussagekraft und besitzen die geringste Validität. Experten besitzen nur substanzielles Wissen über das zu bewertende System (eigene Erfahrung). Deshalb kommt der Auswahl der Experten eine wichtige Bedeutung zu [Lol-03]. Wichtig ist auch, mehrere Experten mit unterschiedlichem Hintergrundwissen zu befragen, um ein möglichst breites Spektrum an Eindrücken zu dem System zu erhalten. In den Vorversuchen zu diesem Labortest wurde der Ablauf des umgesetzten Kommissionierprozesses und die daran angepasste Visualisierung und Interaktion getestet. Fünf Probanden mit unterschiedlichem Wissen im Bezug auf die Kommissionierung und die AR-Technologie testeten das System. Zunächst erfolgte die Evaluierung mit „lautem Denken“ und einem „Interview“ während dem Kommissionierprozess, um einen Eindruck zu gewinnen, wie das System auf die Probanden am Anfang wirkt und wie sie sich damit zurechtfinden. Anschließend führten sie selbständig Kommissionieraufträge aus, um zum einen den Ablauf des implementierten Kommissionierprozesses zu testen und um Beobachtungen machen zu können. Mit einer Befragung endete der Test. Die Ergebnisse führten zu einer Anpassung des Pick-by-Vision-Systems an den konkreten Anwendungsfall.

7.2 Versuchsaufbau

Bei der Durchführung von Versuchen sind unabhängige Variablen (Stellgrößen), die gezielt vom Versuchsleiter geändert werden können, und die ermittelten abhängigen Variablen (Messwerte) zu unterscheiden. In diesem Labortest stellt die Kommissioniertechnologie mit den drei Stufen (Informationsbereitstellung mit Papierliste, Pick-by-Vision mit und ohne Tracking) die unabhängigen, die aufgenommenen Werte die abhängigen Variablen dar. Benutzerstudien lassen sich mit dem within-subject und dem between-subject Design durchführen [Bow-05]. Beim within-subject Design werden alle Stufen der unabhängigen Variablen eines Systems von jedem Probanden getestet, beim between-subjects Design nicht. In dieser Versuchreihe testen alle Probanden alle Kommissioniertechniken (within-subject Design)⁴⁴. Dies führt zu abhängigen (verbundenen) Stichproben, weil mehrere Stichproben mit ein und demselben Individuum durchgeführt wurden. Der Umfang der Stichproben ist gleich, weil jedes Individuum in jeder Stichprobe enthalten ist [Bor-05]. Der Stichprobenumfang entspricht der Anzahl der Messwerte einer abhängigen Variablen und somit der Anzahl der Probanden. Deswegen ist es wichtig, die Reihenfolge, in der ein Proband die verschiedenen Kommissioniertechnologien ausprobiert, zu variieren. Diese Randomisierung verhindert, dass Trends oder eine andere unerkannte Änderung die Ergebnisse verfälschen ([Bor-05], [Kle-98]), indem jede unabhängige Variable den Probanden zufällig zugeordnet wird. Über alle Probanden gesehen, sollte sich dies ausgleichen, d. h., dass alle unabhängigen Variablen gleich oft im ersten, zweiten etc. Durchgang⁴⁵ getestet wurden.

Im diesem Kapitel werden das umgesetzte Kommissioniersystem, die genaue Konfiguration der drei Stufen der unabhängigen Variable, die untersuchten abhängigen Variablen und die zu testenden Nullhypothesen beschrieben.

⁴⁴ Dies entspricht einem vollfaktoriellen Versuch. Da nur eine unabhängige Variable mit drei Stufen untersucht wird, ist dies ein einfaktorielles 3-Gruppen Versuchsdesign.

⁴⁵ Als Durchgang wird der Test einer Stufe einer unabhängigen Variable durch einen Probanden verstanden, d. h. ein Proband hat so viele Durchgänge zu absolvieren, wie es Stufen gibt.

7.2.1 Kommissioniersystem

Das in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml aufgebaute Kommissioniersystem entspricht dem konventionellen Kommissionieren. Im Unterschied zum entsprechenden Einsatzszenario aus Kapitel 4.2.3.1 enthält es keine Palettenplätze als Schnellläuferbereich und es werden keine Aufträge parallel abgearbeitet, so dass eine Hervorhebung des Ablageplatzes nicht erforderlich ist.

Versuchsumgebung

Der Lageraufbau umfasst zwei Regalgassen (siehe Abbildung 7-1). Die Länge der Regale beträgt 3.360 m, die Tiefe eines Regals 400 mm und die Breite der Gasse 1.000 mm. Ein Regal ist in zwei Lagerfächer mit 1.600 mm eingeteilt. Die oberste von fünf Regalebenen befindet sich bei 1.800 mm und die Abstände der Regalebenen betragen jeweils 400 mm. Eine genau parallele Ausrichtung der Regale und die Einteilung der Lagerplätze sind für die Erstellung der Verdeckungsgeometrie wichtig. Ein Lagerplatz ist 220 mm breit und 400 mm tief, so dass sieben Lagerplätze in ein Regalfach passen. Somit stehen 280 Lagerplätze zur Verfügung (Lagerfüllungsgrad 98 %). Bei der Beschriftung der Lagerplätze sind einige Regeln zu beachten, damit Fehler beim Ablesen reduziert werden können ([DLA-06], [Lol-03], [Vog-97]). Durch das Abwechseln von Ziffern und Buchstaben können die einzelnen Elemente der Lagerplatzbezeichnung unterschieden werden. Die Lagerplatzbezeichnung besteht aus einer Ziffer für die Zeile, einem Buchstaben für die Ebene und wiederum einer Ziffer für den Platz. Somit ist die Beschriftung nicht nur eindeutig, sondern auch klar strukturiert und gut ablesbar. Das Lager besteht aus vier Zeilen, die am Gassenanfang mit den Ziffern 1 bis 4 gekennzeichnet sind. Die Ebenen werden von unten beginnend mit den Buchstaben A bis E und die Lagerplätze einer Ebene am Gassenanfang beginnend mit 1 bis 14 durchnummeriert. Ein Lagerplatz ist nun beispielhaft mit 1 E 13 gekennzeichnet. Diese Beschriftung wurde an jedem Lagerfach mit magnetischen Schilder angebracht, deren Position genau ausgerichtet ist, weil die optische Hervorhebung der Lagerfächer über diese Schilder erfolgt. Als LHM dienen für ein Kommissionierlager übliche Sichtlagerkästen mit den Abmaßen 210 x 330 mm und Kleinladungsträger (KLT) mit 600 x 400 mm. Bei einer Höhe von 280 mm müssen die KLT beim Hineingreifen etwas aus dem Regal gezogen werden. Wenn Artikel die Abmaße hat, dass davon mindestens zwei Stück in diesen Sichtlagerkästen Platz finden können, werden diese darin aufbewahrt. Größere Artikel werden in den KLT

oder ohne LHM eingelagert. Da die KLT und einige Kartons breiter als ein Lagerplatz sind, belegen diese entsprechend ihrer Größe mehrere Lagerplätze.



Abbildung 7-1: Versuchsumgebung

Artikelstruktur

Das Sortiment besteht zum einen aus kleinen, etikettierten Schachteln für Normteile wie beispielsweise Schrauben in verschiedenen Größen. Die Schachteln sind entweder leer oder mit den entsprechenden Artikeln gefüllt. Zum anderen werden Arzneimittelverpackungen und Kartonagen aller Größen, sowie Papierware wie Broschüren, Projektblätter und Flyer ohne und mit LHM gelagert. Für die unetikettierten Artikel wurde ein einheitliches Etikett erstellt, damit sie leichter zu erkennen sind. Alle Artikel besitzen eine eigene eindeutige Artikelnummer, deren Aufbau allerdings variiert. Alle Artikel wurden chaotisch eingelagert, so dass optisch ähnliche Artikel auch nebeneinander liegen können. Um das Kommissioniersystem zu vervollständigen, ist eine Basis nötig. Beim papierlosen Pick-by-Vision-System wird an der Basis nur der

Sammelbehälter geholt und abgegeben. Die Basis ist ein Tisch, der ca. 3 m zentral vor dem Lagerbereich aufgebaut ist. Als Sammelbehälter dient ein KLT, der auf einem Kommissionierwagen transportiert wird. Der Kommissionierwagen ist während des gesamten Auftrags mit in die Gasse zu führen. Störgrößen wie der Geräuschpegel und die Beleuchtung, die wesentlichen Einfluss auf die für den AR-Einsatz wichtige Helligkeit hat, waren in der Versuchshalle konstant und entsprachen dem industriellen Umfeld.

Auftragsstruktur

Die Probanden bearbeiten mit jeder Technik sechs Kommissionieraufträge mit insgesamt 30 Positionen (5 Pos/Auftrag) und 61 Entnahmeeinheiten (2,03 EE/Pos)⁴⁶ (siehe Tabelle 7-1). Um Lerneffekten entgegenzuwirken, variieren die Aufträge zwischen den drei Techniken leicht, d. h., dass sich innerhalb eines Auftrags die Positionen unterscheiden können. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Anzahl der Positionen und die Anzahl der Entnahmeeinheiten ebenso konstant bleiben wie die Wege und die Greifvorgänge. So muss der Proband bei einer Technik ins rechte und bei der anderen ins linke Regal nach ähnlichen Artikeln greifen. Durch die Variation der Positionen zwischen den Techniken wird eine Ähnlichkeit der Aufträge nicht erkannt. Die Aufträge sind aber bezüglich ihrer wichtigsten Einflussgrößen nahezu gleich (Pos, EE, Gewicht etc.), so dass diese im Bezug auf das Versuchsergebnis vernachlässigbar sind. Die Reihenfolge der Positionen innerhalb der Aufträge wurde hinsichtlich der Wege manuell optimiert.

Auftrag	Anzahl Positionen	Entnahmeeinheiten	besondere Artikel
A1	3	5	1 x großes Teil
A2	6	9	
A3	9	18	umfangreicher Auftrag
A4	3	4	1 Fehler im Auftrag
A5	6	12	
A6	3	13	viele Positionen

Tabelle 7-1: Auftragsstruktur

⁴⁶ Lolling hat in seiner Untersuchung von Kommissioniersystemen in der Praxis einen Durchschnittswert von 2,2 EE/Pos ermittelt [Lol-03].

Der vierte Auftrag enthielt bei jeder Technik einen absichtlich eingebauten Fehler. In dem angezeigten Lagerfach liegt ein falscher Artikel, d. h. der Fehler müsste bei Abgleich mit der Artikelnummer erkannt werden. Der richtige Artikel befindet sich im Fach darunter. Der Proband sollte also im vierten Auftrag bei jeder Technik erkennen, dass ein falscher Artikel im Lagerfach liegt und diesen Artikel nicht mitnehmen. Wenn nicht, wird ein Fehler angerechnet.

7.2.2 Kommissioniertechnologien

Die drei verwendeten Kommissioniertechnologien stellen die drei Stufen der unabhängigen Variable dar. Spezielle Anpassungen an den Kommissionierprozess und Unterschiede zwischen den drei Techniken werden im Folgenden erläutert.

7.2.2.1 Kommissionierliste

Eine Papierliste stellt die einfachste Möglichkeit dar, dem Kommissionierer die Informationen bereitzustellen (siehe Abbildung 7-2). Für den Labortest wurden eigene Kommissionierlisten unter Einhaltung von Regeln für den Aufbau und die Strukturierung erstellt ([DLA-06], [Lol-03], [Vog-97]). Die für die Versuche wichtigen Daten Lagerplatz, Artikelnummer sowie Entnahmemenge sind in einer Auftragszeile klar voneinander getrennt angegeben. Am Ende der Zeile ist ein Kästchen, in dem ein Haken für die Quittierung gesetzt werden soll, um Auslassungsfehler zu vermeiden. Die Nummer der Position ist für den Kommissionierer unwichtig, aber sie dient als Ordnungsmerkmal in der Liste. Auftrag drei ist so umfangreich, dass dieser auf zwei Seiten ausgedruckt ist und somit den Handhabungsumfang der Liste erhöht. Am Ende bestätigt der Kommissionierer die Abarbeitung des Auftrags mit Datum und Unterschrift und legt die Liste in den Sammelbehälter. Die fertigen Listen sind ausgedruckt bereitgestellt. Allerdings ist der Bereitstellort der Listen einige Meter entfernt von der Basis angeordnet, um den Nachteil eines papiergebundenen Systems zu einem papierlosen, das die Daten online bekommt, zu simulieren.



Kommissionierauftrag

Auftrag Nr.: 3
Seite: 1 von 2

Pos	Lagerplatz	Artikelnummer	Menge	Quittierung
1	1 - D - 02	495510300	2	<input type="checkbox"/>
2	1 - C - 05	7 622200 007417	1	<input type="checkbox"/>
3	1 - A - 08	29915	1	<input type="checkbox"/>
4	2 - C - 11	5209808	2	<input type="checkbox"/>
5	2 - C - 14	0905 3645	2	<input type="checkbox"/>
6	4 - D - 14	527991635	3	<input type="checkbox"/>

Abbildung 7-2: Papierliste zum Auftrag 6

7.2.2.2 Pick-by-Vision mit Tracking

Es wird das im Kapitel 6 entwickelte Pick-by-Vision-System verwendet. Als Tracking-system dienen sechs IR-Kameras, die so aufgebaut wurden, dass der Regalbereich abgedeckt ist. Die Vorversuche ergaben, dass die beste 3D-Visualisierung ein Tunnel aus Kreisen mit einem Rechteck am Ende um das Magnetschild der Lagerfachbeschriftung ist (siehe Abbildung 7-5). Der Tunnel ist dazu animiert, d. h. vom Auge bis zum Lagerplatz blinken die einzelnen Kreise nacheinander auf. Zusätzlich wird die Artikelnummer links und die Menge rechts oben im FoVD angezeigt. Der Lagerplatz wird nicht als Text visualisiert. Auf die Schaltflächen am unteren Bildrand wurde verzichtet, um die Szene nicht zu überfüllen. Bei der modifizierten Interaktion bestätigt ein kurzer Knopfdruck die Aktion, ein langer meldet einen Fehler. Eine weitere Spezifikation des Fehlers ist nicht möglich. Beim Login wird nur der Benutzer aus dem 1D-Menü ausgewählt, auf eine Passwortabfrage wurde verzichtet. Ein Dialog

bei der Aufnahme des Sammelbehälters und die optische Hervorhebung des Abgabeplatzes sind nicht nötig. Den Ablauf zeigt Abbildung 7-3.

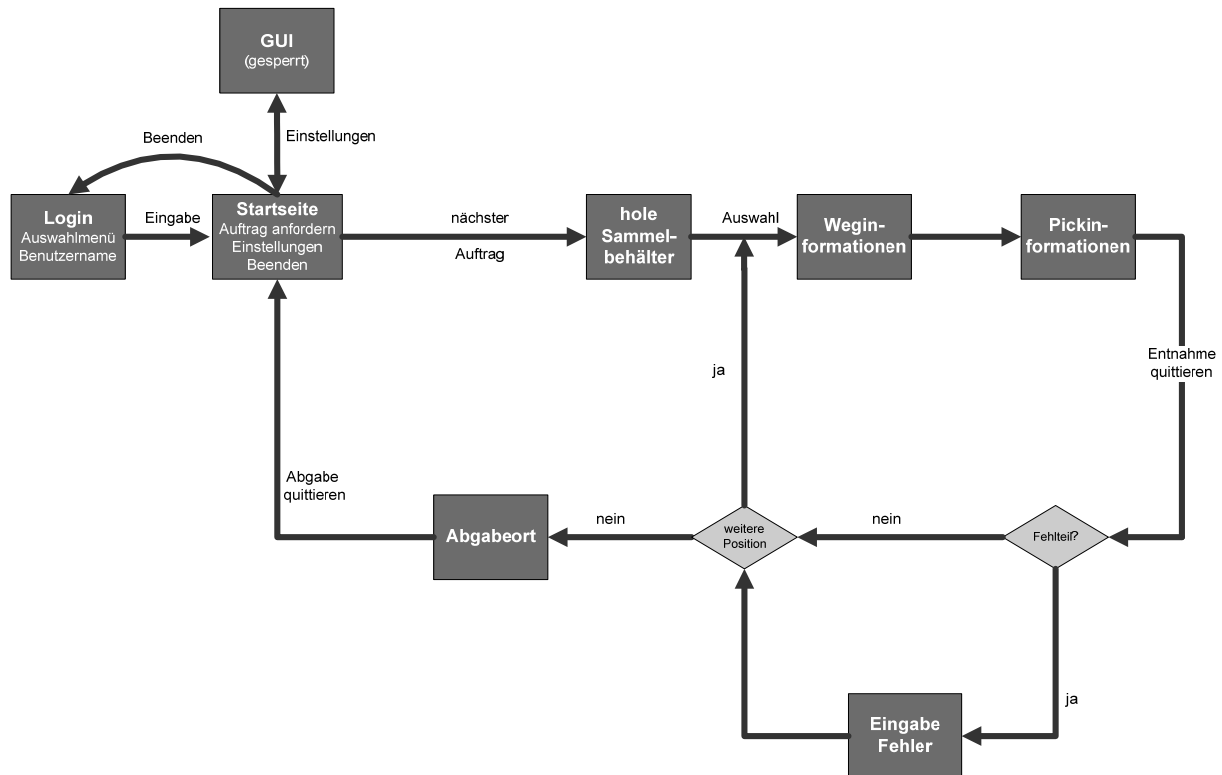


Abbildung 7-3: Umgesetzter Kommissionierprozess im Labortest

7.2.2.3 Pick-by-Vision ohne Tracking

Der Ablauf und die Visualisierung sind bei beiden Systemen bis auf die GUI mit den Positionsdaten gleich (siehe Abbildung 7-4), wobei hier eine Deaktivierung der 3D-Geometrien und eine Aktivierung des 2D-Text erfolgten. Der Lagerort, die Artikelnummer und die Menge werden oben im FoVD – in einer etwas kleineren Schriftgröße – angezeigt und durch eine Umrandung eingeschlossen (siehe Abbildung 7-6). Die Visualisierung unterscheidet sich, weil in dieser Konfiguration ohne die 3D-Geometrien mehr Platz im FoVD zur Verfügung steht. Am unteren Bildrand wird die Schaltfläche mit Buttons zur Quittierung und zur Fehlereingabe genutzt. Die Bestätigung wird mit einem kurzen Klick auf den entsprechenden Button durchgeführt, ein Klick auf den anderen Button führt ins Fehlermenü. Das Target auf der Datenbrille ist zwar ohne Funktion, bleibt aber aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der beiden Pick-by-Vision-Techniken montiert.

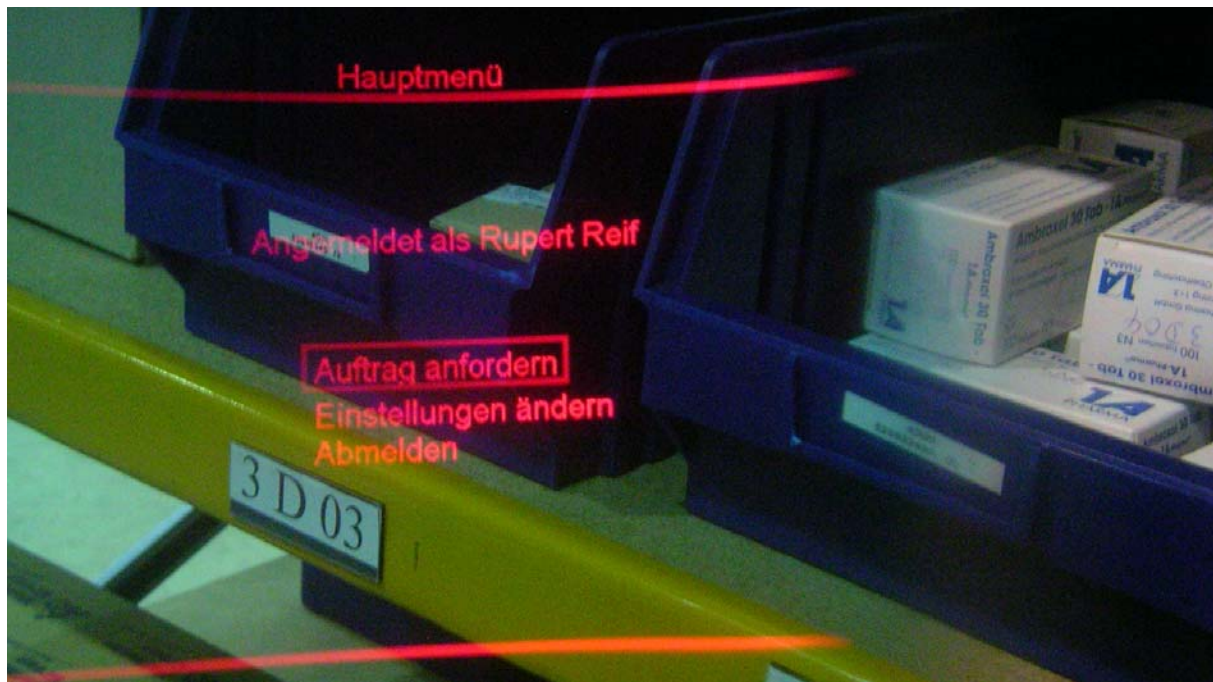


Abbildung 7-4: Hauptmenü für beide Pick-by-Vision-Techniken



Abbildung 7-5: System mit Tracking (Tunnel, Rahmen um Lagerfachbeschriftung)

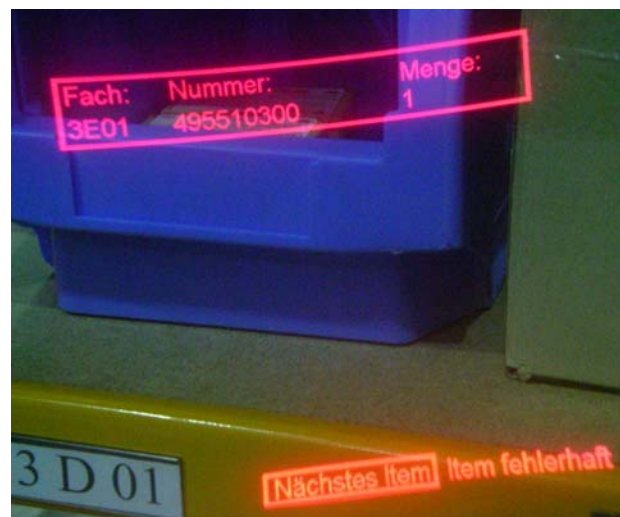


Abbildung 7-6: System ohne Tracking (Angabe einer Position)

7.2.3 Zu messende abhängige Variablen

Es gibt drei Arten von zu messenden Parametern [Bow-05]. Systemparameter wie beispielsweise die Latenzzeit sind für die eigentliche Untersuchung uninteressant, haben aber indirekt Auswirkung auf andere Parameter. Aufgabenparameter wie der Zielkonflikt zwischen der Ausführungszeit und Fehlern lassen sich direkt messen. Benutzerparameter wie beispielsweise die Erlernbarkeit oder die Motivation werden

meist über Fragebögen ermittelt. Leistungsmaße der Informationsaufnahme entsprechen den Leistungsmaßen in der Kommissionierung (Kommissionierfehler, -zeit, -leistung) sowie subjektiven (Ermittlung durch Fragebögen) und ggf. objektive Beanspruchungsindikatoren (z. B. Herzschlagarrhythmie)⁴⁷ [Oeh-04].

7.2.3.1 Logistische Kennzahlen

Kommissionierfehler

Direkt nach der Abgabe eines Sammelbehälters wurde der Auftrag auf Vollständigkeit untersucht. Neben Mengen- und Typfehlern erfolgten auch die Aufnahme von Prozessfehlern wie z. B. eine vergessene Unterschrift oder fehlendes Abhaken bei der Kommissionierliste und die Prüfung, ob der eingebaute Fehler erkannt wurde.

Kommissionierzeit

Die Kommissionierleistung ist in dieser Versuchsreihe direkt proportional zur Kommissionierzeit, weil jeder Proband mit jeder Informationsbereitstellungstechnologie die gleiche Anzahl an Positionen kommissioniert. Deshalb wird im Folgenden nur die Kommissionierzeit betrachtet. Die Zeitaufnahme erfolgte durch den Versuchsleiter in Fortschrittszeitmessung mit einer Stoppuhr und begann beim Login bzw. beim Losgehen und stoppte bei der Abgabe des letzten Sammelbehälters. Die Zeiten für die Teilaufträge wurden abgelesen und wie die Endzeiten notiert.

7.2.3.2 Subjektive Beanspruchung

In diesem Labortest interessieren die Eindrücke des einzelnen Probanden und somit seine Beanspruchung. Dabei ist zu beachten, dass das Ausgangsniveau eines jeden Probanden nicht gleich ist. Nicht nur seine grundsätzlichen individuellen Eigenschaften, sondern auch seine aktuelle Konstitution während des Tests (Tageszeit, persönliche Verfassung etc.) beeinflussen das Ergebnis, wobei der Einfluss auf seine drei Durchgänge in etwa gleich ist. Es ist eine große Variabilität des menschlichen Leistungsverhaltens zu erwarten [Lol-03].

⁴⁷ Verfahren zur Ermittlung objektiver Beanspruchungsfaktoren setzen Sensoren am Probanden voraus. Dies wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Persönlicher Fragebogen

Fragebögen eignen sich gut, um demografische und subjektive Daten abzufragen, weil sie oft angenehmer zu beantworten und besser vergleichbar sind [Bow-05]. Der Nachteil subjektiver Beanspruchungsermittlungsverfahren ist, dass es sich nur um einer Momentaufnahme der empfundenen Beanspruchung handelt und eine vorurteilsfreie Bewertung nicht unbedingt gegeben ist [Oeh-04]. In einem persönlichen Fragebogen werden die Organismusvariablen wie Alter und Geschlecht oder das Tragen von Hilfen zur Augenkorrektur abgefragt (siehe Anhang). Zusätzlich konnten die Probanden ihre Erfahrung mit Kommissioniertechnologien und im AR/VR-Bereich bewerten (keine Erfahrung, etwas Erfahrung, langjährige/große Erfahrung) und angeben in welchem Bereich sie diese machten (Kommissionierliste, PbV, PbL bzw. 3D-Visualisierung, 3D-Computerspiele, Datenbrillen).

Mentale Beanspruchung

Zur Ermittlung der mentalen Beanspruchung wird der Nasa Task Load Index (TLX) verwendet [HaS-88]. Er ist für überwiegend nicht-körperliche Arbeit und somit für die Untersuchung von Suchtechniken konzipiert [Wie-04]. Eine multidimensionale Beurteilungsskala ermöglicht eine sensible Zusammenfassung von verschiedenen Beanspruchungen innerhalb und zwischen bestimmten Aufgaben (aufgaben-, nutzerbezogen). Er umfasst sechs gewichtete, bipolare Skalen (geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung, Leistung, Anstrengung, Frustrationsniveau). Der Proband kann dabei in Feinabstufungen zwischen den Endpunkten der Skala seine Wertung abgeben, der Mittelwert aus diesen sechs Werten gibt den TLX für die untersuchte Informationsbereitstellungstechnologie wider. Bei der Kommissionierung sind physische Aspekte ebenso wichtig wie mentale und zeitliche, so dass alle Faktoren gleich gewichtet wurden. In dieser Arbeit erfolgte die Eingabe über ein Rechner-tool, durch Einstellung eines Schiebereglers zwischen den beiden Endpunkten, was eine schnelle Durchführung und eine automatische Auswertung ermöglichte. Der Test eignet sich für die objektive Bewertung, aber seine Einsatzmöglichkeiten bleiben auf ein grobes Screening begrenzt, weil er keine ausreichende Sensitivität für geringere Aufgabenunterschiede aufweist.

Konzentration

Zur Ermittlung der Konzentrationsleistung wird der standardisierte von R. Brickenkamp entwickelte d2-Aufmerksamkeits-Belastungstest⁴⁸ eingesetzt. Dieser Durchstreichtest besteht aus 14 Zeilen mit jeweils 47 Zeichen, die sich aus der Kombination eines „p“ bzw. „d“ mit ein bis vier Strichen über und unter dem Buchstaben ergeben. Aufgabe des Probanden ist es, jedes d mit zwei Strichen anzustreichen, wobei er so genau und so schnell wie möglich arbeiten soll [Bri-94]. Ziel dieses Tests ist es herauszufinden, ob sich die Konzentration der Probanden in Abhängigkeit von der vorm Ausfüllen des jeweiligen Fragebogens getesteten Technik oder über die gesamte Versuchslaufzeit ändert.

Weitere Fragen

Die beiden Pick-by-Vision-Technologien lassen sich hinsichtlich der beiden Punkte Verdeckung des FoVD (bei dynamischer Visualisierung flächigere virtuelle Daten) und Beschwerden der Probanden untersuchen. Dies erfolgt nach dem jeweiligen Durchgang mit sechs Fragen, je drei zu den Punkten, die durcheinander gestellt und mit einer Likert-Skala⁴⁹ bewertet werden. Bei den Beschwerden waren alle Fragen positiv, bei der Verdeckung eine negativ formuliert, um die Aufmerksamkeit des Probanden zu fördern. Die Beschwerden umfassen Fragen nach visuellen Aspekten, Ermüdung sowie Orientierungsprobleme und Gleichgewichtsstörungen. Zum Abschluss wurden den Probanden drei zusätzliche Fragen gestellt:

- Mit welcher Methode würden Sie am liebsten arbeiten?
- Mit welcher Methode hatten Sie ihrer Meinung nach die beste Zeit?
- Mit welcher Methode würden Sie länger arbeiten wollen?

Die Probanden haben dazu die Möglichkeit eigene Anmerkungen zu machen, beispielsweise hinsichtlich ihrer Eindrücke. Es ist immer ein subjektiver Einfluss zu erwarten, denn ein Prototyp hat noch kein endgültiges Design und macht damit einen wenig handhabbaren Eindruck.

⁴⁸ Alle benutzten Fragebögen befinden sich im Anhang.

⁴⁹ Likert-Skala mit fünf Stufen:

stimme ganz entschieden zu - stimme zu - neutral - stimme nicht zu - stimme ganz und gar nicht zu

7.2.4 Untersuchungsziele

Für die Überprüfung von Zielen werden die unabhängigen Variablen auf den Einfluss der abhängigen Variablen untersucht. Dazu lassen sich Alternativhypothesen aufstellen, d. h., dass Unterschiede zwischen den unabhängigen Variablen hinsichtlich der abhängigen bestehen. Beispielsweise ist die Kommissionierzeit bei den untersuchten Kommissioniertechniken nicht gleich. Um eine spätere Auswertung zu vereinfachen, werden die Nullhypothesen H_0 mit komplementären Aussagen, d. h. dass keine Unterschiede bestehen, aufgestellt und geprüft [Bor-05].

Als ein Ziel lässt sich eine generelle Aussage für die Entwicklung von neuen 3D-UI aufstellen. Dieses ist besser als eine herkömmliche Vergleichstechnik, wenn die Aufgaben besser, einfacher oder schneller bewältigt werden und der Benutzer nicht frustriert ist oder sich unbehaglich fühlt [Bow-05].

These: Die Informationsbereitstellung hat Einfluss auf die Kommissionierfehlerquote. Theoretische Überlegungen haben bereits erkennen lassen, dass die Art der Informationsbereitstellung einen wesentlichen Einfluss auf die Fehleranfälligkeit der Kommissionierung hat [Cro-07].

$H_{0,1}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für alle drei Kommissioniertechnologien gleich.

$$f_{PL} = f_{oTr} = f_{mTr}$$

These: Bei vielen Untersuchungen zu AR-Systemen zeigt sich eine Abhängigkeit der Fehlerquote von der Erfahrung der Probanden im Umgang mit dieser Technologie.

$H_{0,2a}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von der 3D-Erfahrung.

$$f_{oTr, 3D} = f_{oTr, ohne 3D}$$

$H_{0,2b}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von der 3D-Erfahrung.

$$f_{mTr, 3D} = f_{mTr, ohne 3D}$$

These: Erfahrungen der Probanden im Bereich der Kommissionierung sensibilisieren für den Ablauf und die Notwendigkeit der fehlerfreien Kommissionierung.

$H_{0,3a}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für die Papierliste unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$f_{\text{Liste, Kom-Erf}} = f_{\text{Liste, ohne Kom-Erf}}$$

$H_{0,3b}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$f_{\text{oTr, Kom-Erf}} = f_{\text{oTr, ohne Kom-Erf}}$$

$H_{0,3c}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$f_{\text{mTr, Kom-Erf}} = f_{\text{mTr, ohne Kom-Erf}}$$

These: Am Anfang sind der Aufbau und der Ablauf für den Probanden unbekannt. Da es sich um ein einfaches Szenario handelt, lernt er schnell dazu, so dass Lerneffekte eine Auswirkung auf die Ergebnisse haben.

$H_{0,4a}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für die Papierliste unabhängig von Lerneffekten.

$$f_{\text{Liste, Durchgang 1}} = f_{\text{Liste, Durchgang 2}} = f_{\text{Liste, Durchgang 3}}$$

$H_{0,4b}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von Lerneffekten.

$$f_{\text{oTr, Durchgang 1}} = f_{\text{oTr, Durchgang 2}} = f_{\text{oTr, Durchgang 3}}$$

$H_{0,4c}$: Die Kommissionierfehlerquote f ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von Lerneffekten.

$$f_{\text{mTr, Durchgang 1}} = f_{\text{mTr, Durchgang 2}} = f_{\text{mTr, Durchgang 3}}$$

7 Evaluierung in einem Labortest

These: Die Wahl der Informationsbereitstellungstechnologie hat einen Einfluss auf die Kommissionierzeit.

$H_{0,5}$: Die Kommissionierzeit t ist für alle drei Kommissioniertechnologien gleich.

$$t_{\text{Liste}} = t_{\text{oTr}} = t_{\text{mTr}}$$

These: Bei vielen Untersuchungen zu AR-Systemen zeigt sich eine Abhängigkeit der Leistung von der Erfahrung der Probanden im Umgang mit dieser Technologie.

$H_{0,6a}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von der 3D-Erfahrung.

$$t_{\text{oTr, 3D}} = t_{\text{oTr, ohne 3D}}$$

$H_{0,6b}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von der 3D-Erfahrung.

$$t_{\text{mTr, 3D}} = t_{\text{mTr, ohne 3D}}$$

These: Erfahrungen im Bereich der Kommissionierung senken die Einlernphase und beschleunigen den Ablauf.

$H_{0,7a}$: Die Kommissionierzeit t ist für die Papierliste unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$t_{\text{Liste, Kom-Erf}} = t_{\text{Liste, ohne Kom-Erf}}$$

$H_{0,7b}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$t_{\text{oTr, Kom-Erf}} = t_{\text{oTr, ohne Kom-Erf}}$$

$H_{0,7c}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von der Kommissioniererfahrung.

$$t_{\text{mTr, Kom-Erf}} = t_{\text{mTr, ohne Kom-Erf}}$$

These: Lerneffekte können sich sehr stark auf die Kommissionierzeit auswirken (z. B. [ScB-07b]).

$H_{0,8a}$: Die Kommissionierzeit t ist für die Papierliste unabhängig von Lerneffekten, d. h. ob die Technik als erstes, zweites oder drittes getestet wurde.

$$t_{\text{Liste, Durchgang 1}} = t_{\text{Liste, Durchgang 2}} = t_{\text{Liste, Durchgang 3}}$$

$H_{0,8b}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision ohne Tracking unabhängig von Lerneffekten.

$$t_{\text{oTr, Durchgang 1}} = t_{\text{oTr, Durchgang 2}} = t_{\text{oTr, Durchgang 3}}$$

$H_{0,8c}$: Die Kommissionierzeit t ist für Pick-by-Vision mit Tracking unabhängig von Lerneffekten.

$$t_{\text{mTr, Durchgang 1}} = t_{\text{mTr, Durchgang 2}} = t_{\text{mTr, Durchgang 3}}$$

These: Bei einer intuitiven Papierliste sollte die mentale Beanspruchung niedriger sein als mit einem unbekanntem System.

$H_{0,9}$: Die mentale Beanspruchung (NASA TLX) ist für alle drei Kommissioniertechnologien gleich.

$$TLX_{\text{Liste}} = TLX_{\text{oTr}} = TLX_{\text{mTr}}$$

These: Die in einem standardisierten Test gezeigte Konzentrationsleistung sollte mit jeder Wiederholungsmessung zunehmen.

$H_{0,10}$: Die Konzentrationsleistung (d2-Test) ist für alle drei Kommissioniertechnologien gleich.

$$d2_{\text{Liste}} = d2_{\text{oTr}} = d2_{\text{mTr}}$$

These: Der Tunnel bei der Variante mit Tracking verdeckt deutlich mehr vom FoVD als die eine Auftragszeile beim System ohne Tracking.

$H_{0,11}$: Die Verdeckung ist unabhängig von der eingesetzten Visualisierung.

$$V_{oTr} = V_{mTr}$$

These: Die Anzahl der subjektiv berichteten körperlichen Beschwerden sollte beim Einsatz des Trackingsystems durch die dynamische Visualisierung höher sein als beim System ohne Tracking.

$H_{0,12}$: Die körperlichen Beschwerden sind unabhängig von der eingesetzten Visualisierung.

$$kB_{oTr} = kB_{mTr}$$

These: Bei den offenen Fragen sind kritische Äußerungen bezüglich ergonomischer Aspekte der Datenbrille, des mobilen Rechners ergeben (Tragekomfort, Kabel) sowie zum Ablesen der virtuellen Daten geben.

7.3 Versuchsdurchführung

Für die Vorversuche, die daraus abgeleiteten Anpassungen und den eigentlichen Labortest standen sieben Arbeitstage zur Verfügung, wovon vier für den Labortest genutzt wurden, bei dem für einen Probanden ein Zeitaufwand von ca. zwei Stunden veranschlagt war. Vor dem Labortest wurde festgelegt, in welcher Reihenfolge die Probanden die Durchgänge mit den drei Stufen der unabhängigen Variable Informationsbereitstellungstechnologie durchführen (Randomisierung). Die $3! = 6$ verschiedenen Reihenfolgen oTr-PL-mTr, PL-oTr-mTr, mTr-oTr-PL, oTr-mTr-PL, PL-mTr-oTr und mTr-PL-oTr wurden über Zufallszahlen festgelegt.

Um den Einfluss von Störvariablen möglichst gering zu halten, ist auch der Ablauf für alle Probanden gleich zu gestalten (siehe Abbildung 7-7). Bei allen Messungen, die mit Menschen durchgeführt werden, muss die Person des Versuchsleiters und sein Verhalten gegenüber den Versuchsobjekten als versteckte Variable in Erwägung gezogen werden [Mit-65]. Da die Versuchsleiter aus terminlichen Gründen wechselten,

wurde eine Checkliste erstellt, die das Vorgehen und die Anweisungen an die Probanden enthielt. Die Einweisung dient auch dazu, Gewöhnungseffekten entgegenzuwirken, d. h., dass die Probanden mit einer gewissen Vorkenntnis in die Versuche gingen.

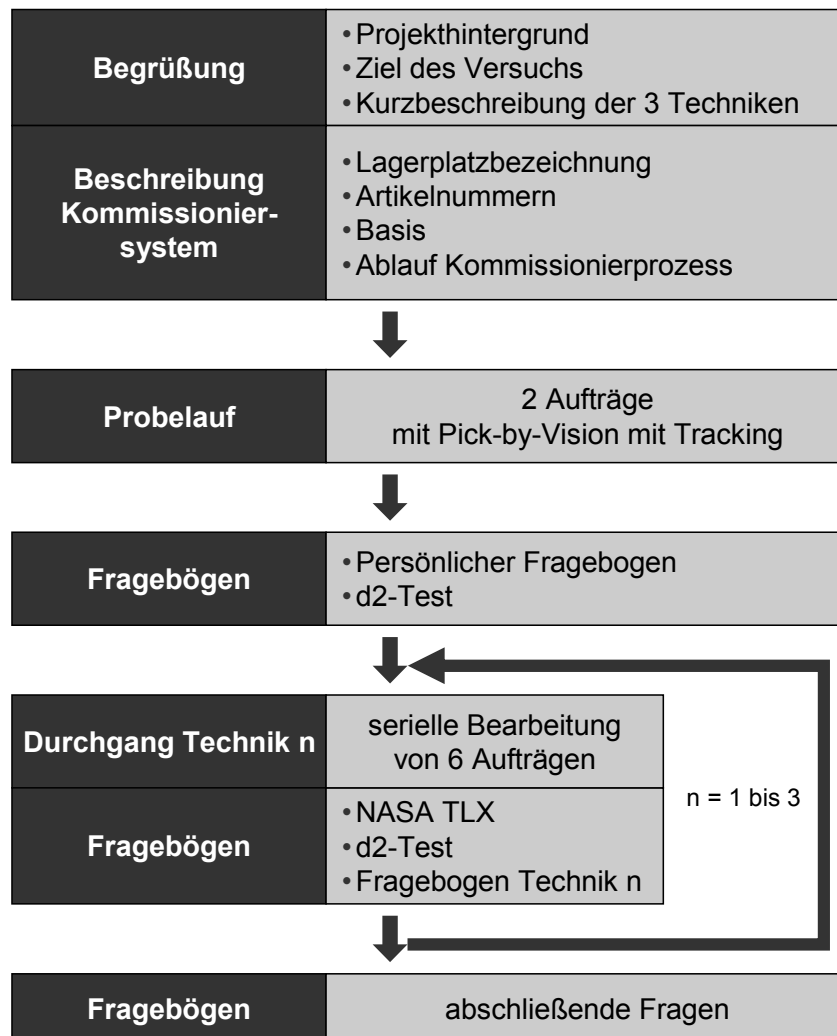


Abbildung 7-7: Versuchsablauf für einen Probanden

Die Einweisung umfasst Hintergrundwissen zum Labortest, die Erläuterung des Lageraufbaus, der Lagerfachkennzeichnung und der unterschiedlichen Artikel bzw. Artikelnummern. Ihnen wurde gesagt, dass sie die Artikelnummer auf der Greifeinheit mit der auf der Informationsbereitstellungstechnologie vergleichen sollen. Ein derartiger Abgleich senkt die Fehlerrate deutlich (z. B. um 103 % bei Lollings Laboruntersuchung [Lol-03]). Nach der Einweisung erfolgten zwei Probelaufe mit Pick-by-Vision mit Tracking. Beim ersten begleitete der Versuchsleiter die Probanden und erläuterte die Funktionsweise. Die Probanden führten den Kommissionierwagen nicht mit und entnahmen keine Artikel. Beim zweiten Testlauf kommissionierten sie einen Auftrag

alleine. Da das System ohne Tracking auf dem gleichen Interaktionskonzept beruht, erfolgte keine explizite Einweisung. Bei diesen Versuchsdurchgängen wurde nicht nur sichergestellt, dass die Probanden die grundsätzliche Funktionsweise des Pick-by-Vision-Systems verstanden, sondern sie lernten auch den Ablauf und die Artikel genauer kennen. Bei der Liste erfolgte ebenfalls eine Unterweisung im Prozessablauf. Die Probanden hatten während der Einführung, dem Ausfüllen der Fragebögen und dem Probedurchlauf, die Möglichkeit, Fragen zu stellen. Den Probanden wurde gesagt, dass sie den Kommissionierwagen mit in die Gasse nehmen sollen und dass ihr Ziel ist, so schnell und fehlerfrei wie möglich zu arbeiten. Vor dem ersten Durchgang mussten die Probanden den Fragebogen zu den persönlichen Daten und den ersten d2-Test bewerkstelligen. Nach Abschluss der einzelnen Durchgänge füllten die Probanden eine NASA-TLX-Test, einen d2-Test sowie ggf. einen Fragebogen zur getesteten Technik aus. Währenddessen wurde das Lager eingeräumt und die Pick-by-Vision-Systeme wieder auf den Ausgangszustand für den nächsten Durchgang gebracht.

7.4 Auswertung

Der Labortest wurde mit den Analysefunktionen von MS Excel, dem frei zugänglichen Programm DataLab der Epina GmbH sowie Statistikbüchern ([Bor-05], [Kle-98], [Küh-01]) ausgewertet. Zunächst erfolgte die deskriptive Statistik mit der Bestimmung von arithmetischem Mittelwert, Median⁵⁰, Maxima/Minima, Standardabweichung und Varianz. Die Streuung ist ein weiterer Parameter, der in der Literatur mit der Standardabweichung, der Varianz oder auch dem Abstand zwischen dem minimalen oder maximalen Wert gleichgesetzt wird. Der Abstand zwischen Minimum und Maximum wird als Stichprobenspannweite definiert und die Streuung wird synonym für die Varianz bzw. die Standardabweichung verwendet. Die deskriptive Statistik gibt aber keinen Aufschluss darüber, ob von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann, d. h. ob die Ergebnisse aussagekräftig hinsichtlich der Annahme oder Ablehnung der Nullhypothesen sind. Dies erfolgt mit der analytischen

⁵⁰ Median: Der Wert einer Verteilung, der die Gesamtzahl halbiert, so dass 50 % der Fälle darüber und 50% darunter liegen [Bor-05]. Der Median hat gegenüber dem arithmetischen Mittelwert den Vorteil, dass er weniger empfindlich gegenüber Ausreißern ist.

Statistik, deren Tests in dieser Arbeit mit einem Signifikanzniveau α^{51} von 5 % durchgeführt wurden.

7.4.1 Probanden

Da nur eine unabhängige Variable mit drei Stufen untersucht wurde, wird für einen vollfaktoriellen Versuch nur eine geringe Anzahl an Probanden benötigt. Der Mittelwert und die Varianz, die sich aus den Messwerten einer Stichprobe berechnen lassen, sind nur Schätzwerte für den Mittelwert und die Varianz der Grundgesamtheit, d. h. je größer der Stichprobenumfang, desto geringer ist die Streuung und desto genauer die Schätzung [Kle-98]. Im zur Verfügung stehenden Zeitraum nahmen 19 vor allem männliche Probanden am Labortest teil. Da nach 18 Probanden eine ausgewogene Randomisierung erreicht war, löste der Versuchsleiter dem 19. Probanden die Reihenfolge, in der er die drei Techniken testete, zu. Das Durchschnittsalter betrug 27,2 Jahre, wobei der jüngste 18 und der älteste 45 Jahre alt war (Standardabweichung: 6,78). Es handelte es sich um sechs Akademiker, elf Studenten und zwei Facharbeiter eines Industriepartners. Diese Stichprobe entspricht nicht unbedingt der in der Praxis in vielen Kommissionierlagern vorhandenen Verteilung. 42,1% der Probanden hatten 3D- und 47,4% Kommissioniererfahrung.

Geschlecht	3 Frauen		16 Männer
Durchschnittliches Alter	27,2 Jahre		
Alterspanne	18 Jahre	bis	45 Jahre
Standardabweichung	6,78		
Beruf	2 Facharbeiter	11 Studenten	6 Akademiker
3D-Erfahrung	8 Probanden		
Kommissioniererfahrung	9 Probanden		

Tabelle 7-2: Probandenstruktur

Tabelle 7-2 fasst die Probandenstruktur zusammen. Bei Brillenträgern zeigte sich, dass dies keine Auswirkungen auf das Tragen der Datenbrille hatte. Die Probanden nahmen freiwillig teil. Nach Abschluss ihrer Versuchsreihe erhielten sie ein kleines

⁵¹ Signifikanzniveau: Irrtumswahrscheinlichkeit, die das Untersuchungsergebnis maximal aufweisen darf, damit die Alternativhypothese als bestätigt bzw. die Nullhypothese verworfen werden kann [Bor-05].

Geschenk, denn dieses fördert die Freiwilligkeit mehr als eine finanzielle Vergütung [Oeh-04].

7.4.2 Kommissionierfehler

Fehlerwahrscheinlichkeiten im Labortest sind meist deutlich über den in der Praxis zu verzeichneten Fehlerwerten, weil zum einen ungeübte Probanden (v. a. Studenten) die Versuche durchführen (wobei ein Lerneffekt nach einigen Durchgängen erkennbar ist) und zum anderen fast keine Wegzeiten anfallen und somit eine hohe Konzentration (Identifikation und Entnahme) gefordert ist [Lol-03]. Bei der deskriptiven Auswertung beträgt die Fehlerrate bei der Liste 1,40 %, bei Pick-by-Vision ohne Trackingsystem 2,23 % und mit Trackingsystem 2,22 %. Dies ist für den Praxiseinsatz zu hoch (siehe Abbildung 7-8).

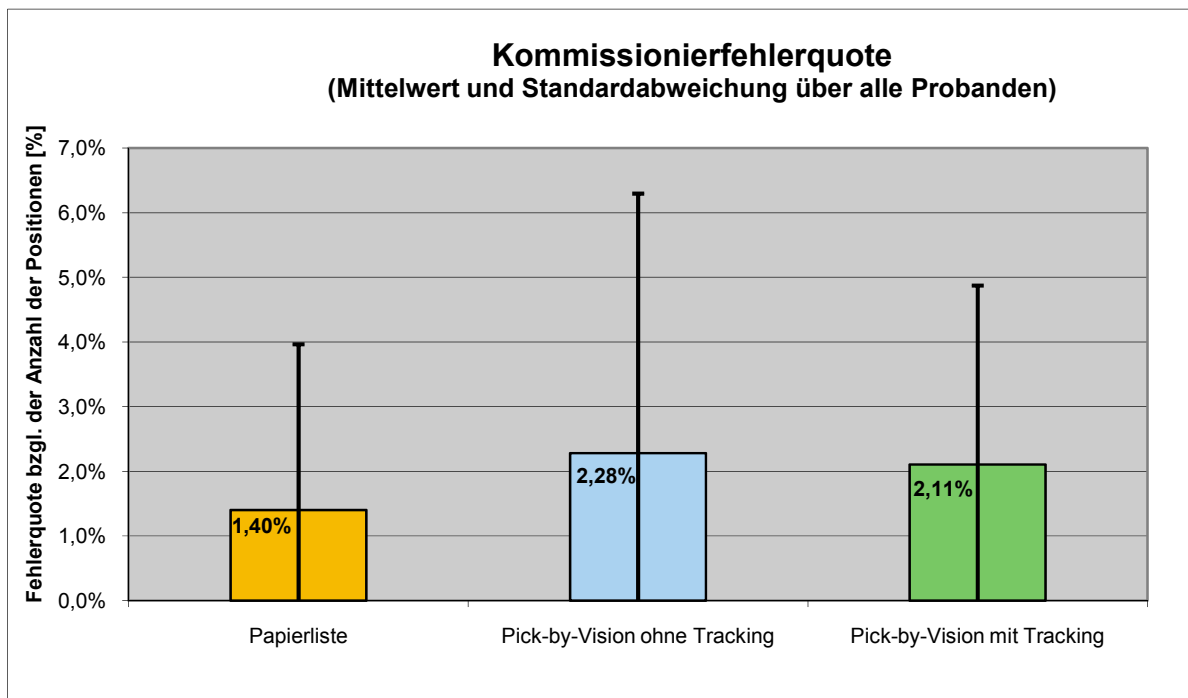


Abbildung 7-8: Kommissionierfehlerquote (Mittelwert und Standardabweichung über alle Probanden)

Da die Stichproben kleiner als 30 sind, wird ein Kolmogorov-Smirnov-Test zur Prüfung auf Normalverteilung eingesetzt⁵². Die Fehlerquoten unterliegen nicht der Normalverteilung, sondern der für die Bewertung von auftretenden Fehlern üblichen

⁵² Bei kleinen Stichproben ($n < 30$) ist eine Prüfung auf Normalverteilung notwendig [Bor-05].

Poisson-Verteilung, weil die Fehleranzahl nur ganzzahlige nicht-negative Werte annehmen kann und es sich bei Fehlern um ein „seltenes Ereignis“ handelt [Lol-03]. Das Vertrauensintervall⁵³ für den Mittelwert der Fehlerquote ist bei der Papierliste zwischen 0,77 und 2,23 %, für Pick-by-Vision ohne Tracking zwischen 1,46 und 3,33 % und mit Tracking zwischen 1,30 und 3,09 %.

Die Probanden mit drei Kommissionierfehlern bei Pick-by-Vision mit Tracking bzw. der Liste könnten Ausreißer sein, werden aber weiter berücksichtigt⁵⁴. Bei Pick-by-Vision ohne Tracking gibt es je einen Probanden mit vier und mit drei Fehlern sowie zwei mit zwei Fehlern. Vier von 19 Probanden begingen 85 % der Fehler, was zu einer rechtsschiefen Verteilung führt. Eine Aussage zu speziellen Ausreißern ist deshalb nicht möglich. Bei den anderen beiden Techniken verteilen sich die Fehler auf mehr Probanden, wobei bei Pick-by-Vision mit Tracking ebenfalls eine rechtsschiefe Verteilung vorliegt. Die Prüfung der Nullhypothese mit dem nicht parametrischen und verteilungsunabhängigen Friedman-Test für m verbundene Stichproben zeigt keinen signifikanten Unterschied. Die Nullhypothese $H_{0,1}$ wird nicht verworfen.

$H_{0,1}: f_{PL} = f_{oTR} = f_{mTr} \rightarrow$ nicht verworfen

Mit der Papierliste machten die Probanden mit acht Fehlern am wenigsten, wobei alle den eingebauten Fehler erkannten. Es wurden ein Typ-, drei Prozess-, drei Mengen- und ein Auslassungsfehler begangen. Beim ersten Auftrag wurde nur ein Fehler begangen.

Bei Pick-by-Vision ohne Trackingsystem wurden 13 Fehler - sechs Auslassungs-, fünf Mengen- und ein Typfehler - begangen, sowie einmal der eingebaute Fehler nicht erkannt. Bei Einsatz des Trackingsystems war die Anzahl der Fehler mit zwölf ähnlich hoch. Es handelte sich um zehn Auslassungs- und zwei Mengenfehler. Eine Zusammenfassung aller in diesem Labortest gemachten Fehler zeigen die Abbildung 7-9 und Abbildung 7-10.

⁵³ Bei $\alpha = 5\%$ liegt der unbekannte Wert der Grundgesamtheit mit 95 %iger Sicherheit innerhalb dieses Bereichs [Kle-98]. Der Begriff Konfidenzintervall wird synonym verwendet.

⁵⁴ Wenn ein einzelner Wert der Zufallsstichprobe weit außerhalb des normalen Streubereichs liegt, wird er oft als Ausreißer bezeichnet. Er kann zum Kollektiv gehören oder durch einen unbekanntem Störeffekt erzeugt worden sein. Ausreißer sollen niemals ohne Klärung der Ursache verworfen werden. Faustregel: Ausreißer sind Einzelwerte, die um mehr als das dreifache der Standardabweichung vom Mittelwert weg liegen (bei Normalverteilung: Grubbs-Ausreißer-Test) [Küh-01].

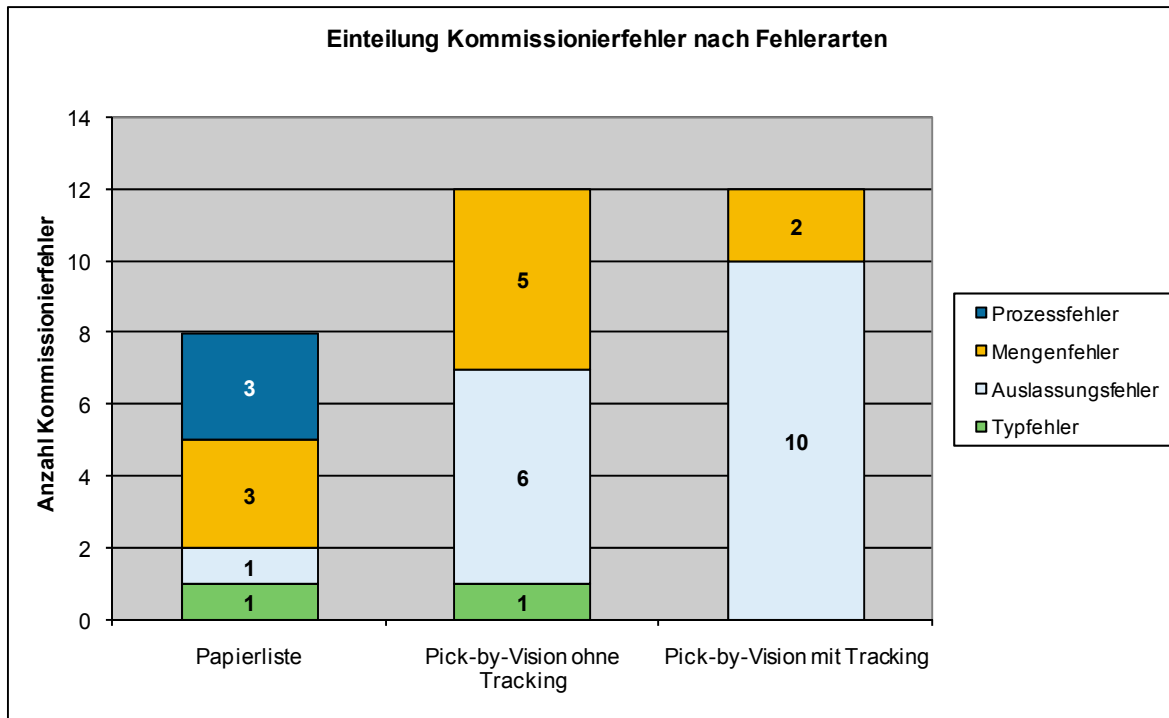


Abbildung 7-9: Einteilung aller Kommissionierfehler nach Fehlerart

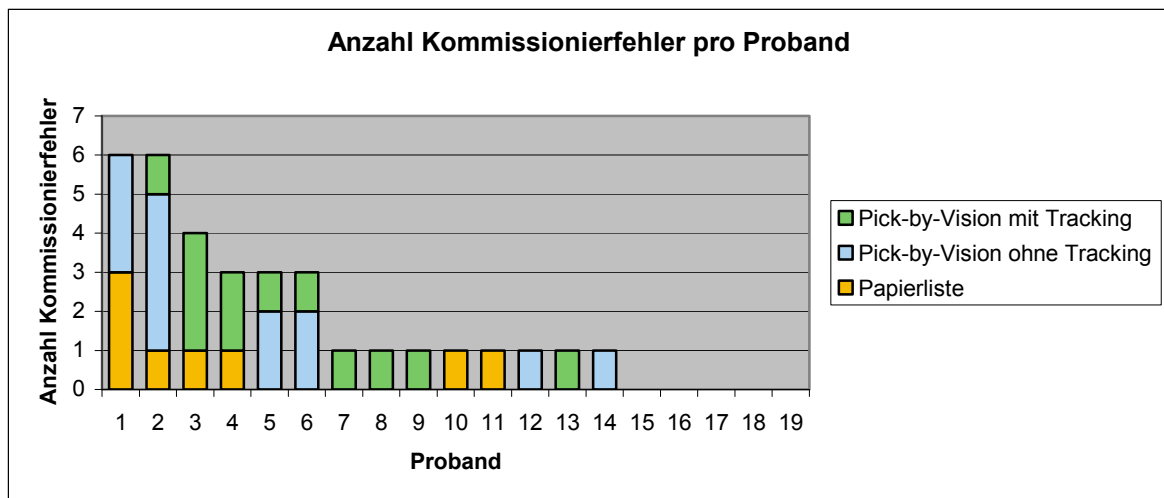


Abbildung 7-10: Anzahl Kommissionierfehler pro Proband

Die Auslassungsfehler bei beiden Pick-by-Vision-Systemen können – bis auf zwei beim System mit Tracking – auch als Prozessfehler eingestuft werden, weil die Probanden bei der Bestätigung zu schnell oder zu lange drückten. Es war kein Mechanismus eingebaut, dies zu verhindern. Durch das akustische Feedback erkannten viele ihren Fehler, konnten aber nicht mehr zurückspringen. Dieser systematische Fehler im System lässt sich leicht korrigieren. Damit alle Probanden die gleichen Voraussetzungen hatten, wurde die Optimierung während der Versuche nicht durch-

geführt. Dieser Fehler kann somit herausgerechnet werden. Es ergibt sich ein anderes Bild (siehe Abbildung 7-11). Die Mengenfehler ließen sich mit einem Sprachsystem mit der Ansage der Entnahmemenge zur Quittierung weiter reduzieren [Gün-09]. Die Fehlerquote läge dann bei beiden Systemen zwischen 0,3 und 0,4 %. Diese Quoten wären vor dem Hintergrund, dass es sich um einen Labortest handelte, für die Praxis geeignet.

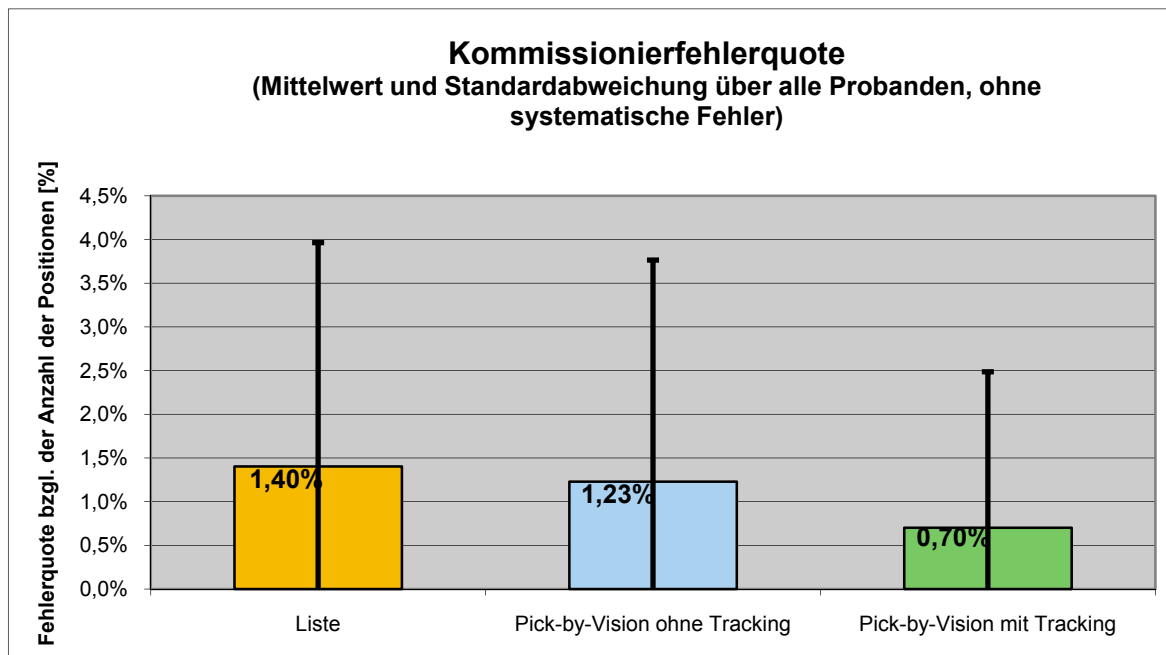


Abbildung 7-11: Kommissionierfehlerquote (ohne systematische Fehler)

Kommissionierfehler und 3D- bzw. Kommissioniererfahrung

Acht Probanden hatten 3D-Erfahrung im Fragebogen aufgeführt. Für die Papierliste spielt dies keine Rolle. Eine Prüfung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test weist üblicherweise für Fehlerraten bis auf die Stichprobe des Systems ohne Tracking und mit 3D-Erfahrung Normalverteilungen auf. Ein signifikanter Unterschied wird mit einem verteilungsfreien Mann-Whitney U-Test, der angewandt werden kann, wenn eine Stichprobe normalverteilt ist und eine andere nicht, nicht nachgewiesen. Das System ohne Tracking zeigt sehr erstaunliche Werte, denn die Probanden mit 3D-Erfahrung weisen mit 4,53 % eine um über sieben Mal höhere Fehlerquote auf als die ohne diese Erfahrung. Der Unterschied ist damit zu erklären, dass zwei Probanden mit sieben der insgesamt 13 Fehler 3D-Erfahrung angaben und das Ergebnis verfälschten. Beim System mit Tracking unterscheiden sich die Mittelwerte kaum, was ein t-Test bestätigt, wohingegen die Varianz der unerfahrenen

vier Mal höher war als die der Erfahrenen. Ein F-Test weist den Unterschied nach. Abbildung 7-12 zeigt die Übersicht.

$H_{0, 2a}: f_{oTr, 3D} = f_{oTr, ohne 3D}$ → nicht verworfen

$H_{0, 2b}: f_{mTr, 3D} = f_{mTr, ohne 3D}$ → verworfen

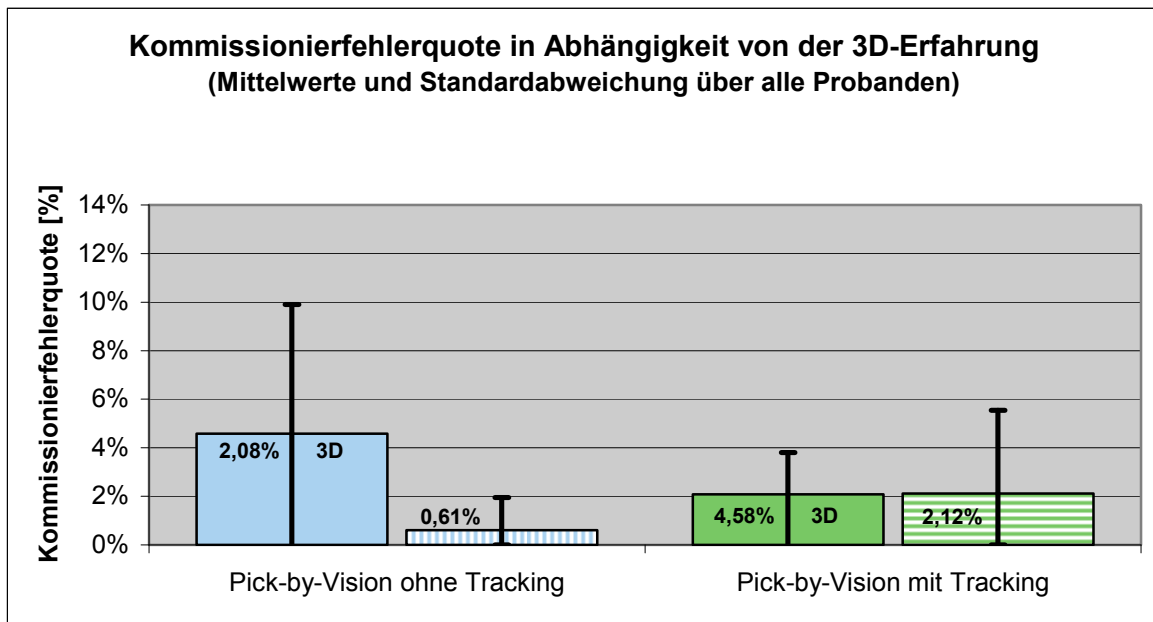


Abbildung 7-12: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der 3D-Erfahrung der Probanden

Als zweiten Einflussfaktor gilt es, den Einfluss der Kommissioniererfahrung auf die Fehlerquote zu untersuchen (siehe Abbildung 7-13). Bei der Papierliste ist die Stichprobe mit Kommissioniererfahrung normalverteilt und die ohne nicht (Kolmogorov-Smirnov-Test). Ein verteilungsfreier Mann-Whitney U-Test zeigt keinen Unterschied auf. Beim System ohne Tracking sind beide Stichproben nicht normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov-Test), wobei ein Mann-Whitney U-Test keine Signifikanz aufweist. Beim System mit Tracking sind beide Stichproben normalverteilt. Ein t-Test zeigt keinen Unterschied der Mittelwerte und ein F-Test keinen bei den Varianzen auf. Die Differenzen sind auf den ersten Blick sowohl bei den Mittelwerten als auch bei den Varianzen erkennbar. Diese werden aber durch einzelne Probanden hervorgerufen, so dass kein signifikanter Unterschied nachgewiesen wird und die Nullhypothesen somit nicht verworfen werden. Die Kommissioniererfahrung hat also keinen Einfluss auf die Kommissionierfehlerquote.

$H_{0, 3a}: f_{Liste, Kom-Erf} = f_{Liste, ohne Kom-Erf}$ → nicht verworfen

$$H_{0, 3b}: f_{oTr, Kom-Erf} = f_{oTr, ohne Kom-Erf}$$

→ nicht verworfen

$$H_{0, 3c}: f_{mTr, Kom-Erf} = f_{mTr, ohne Kom-Erf}$$

→ nicht verworfen

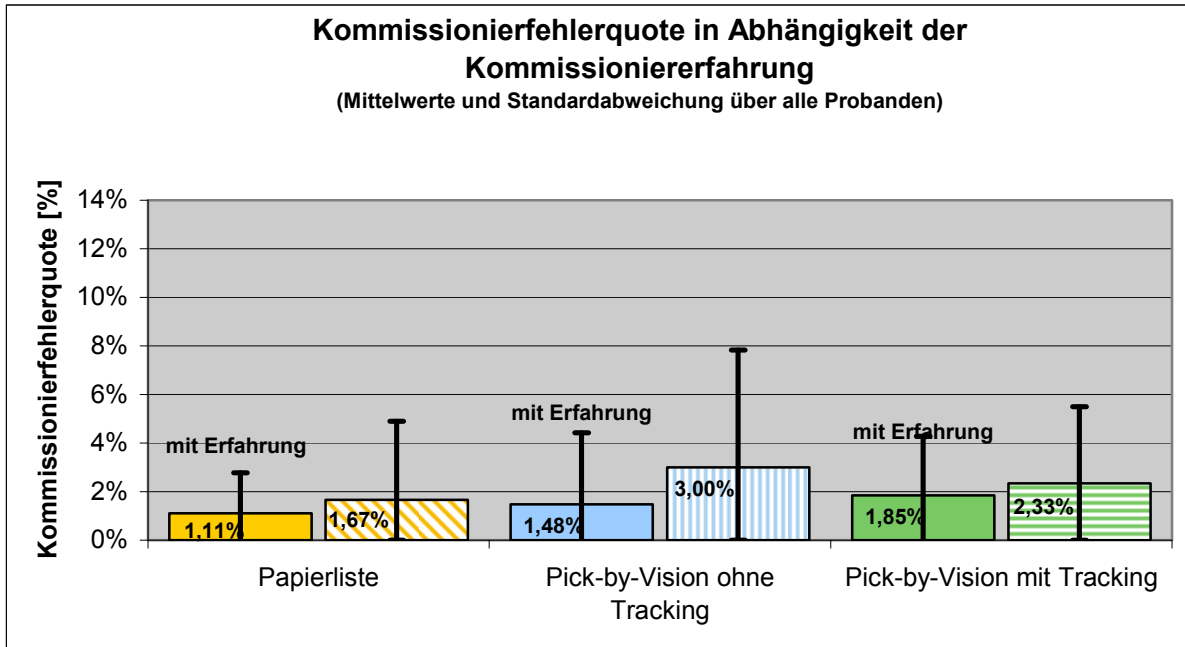


Abbildung 7-13: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der Kommissioniererfahrung der Probanden

Kommissionierfehler und Lerneffekte

Die Abhängigkeit von der Reihenfolge, in der die Probanden die Techniken ausprobierten, gilt es genauer zu analysieren. Die Fehlerquoten unterliegen nicht der Normalverteilung, so dass eine zweifaktoriellen Varianzanalyse (MANOVA) nicht eingesetzt werden kann. Der Zusammenhang ist auch grafisch darstellbar (siehe Abbildung 7-14). Bei der Untersuchung der Lerneffekte ist bei der Papierliste nicht zu erkennen, dass zu Beginn die meisten Fehler gemacht werden. Die Fehlerquote steigt sogar leicht an, je später der Proband mit der Papierliste gearbeitet hat. Bei Pick-by-Vision ohne Tracking als zweiten Durchgang wurden keine Fehler begangen. Der starke Anstieg zum dritten Durchgang erklärt sich damit, dass die Probanden mit vielen Fehlern diese Technik als letzte testeten. Steigende Fehlerquote zum Ende der gesamten Versuchsreihe können mit der Ermüdung oder auch der Langeweile der Probanden begründet werden. Bei Pick-by-Vision mit Tracking ist ein gegenteiliger Effekt zu beobachten. Selbst bei andauernder Versuchszeit und bei steigender Mü-

7 Evaluierung in einem Labortest

digkeit oder bei Langeweile war die Führung des Greifvorgangs noch so gut, dass wenige Fehler gemacht wurden.

$H_{0, 4a}: f_{\text{Liste, Durchgang 1}} = f_{\text{Liste, Durchgang 2}} = f_{\text{Liste, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

$H_{0, 4b}: f_{\text{oTr, Durchgang 1}} = f_{\text{oTr, Durchgang 2}} = f_{\text{oTr, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

$H_{0, 4c}: f_{\text{mTr, Durchgang 1}} = f_{\text{mTr, Durchgang 2}} = f_{\text{mTr, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

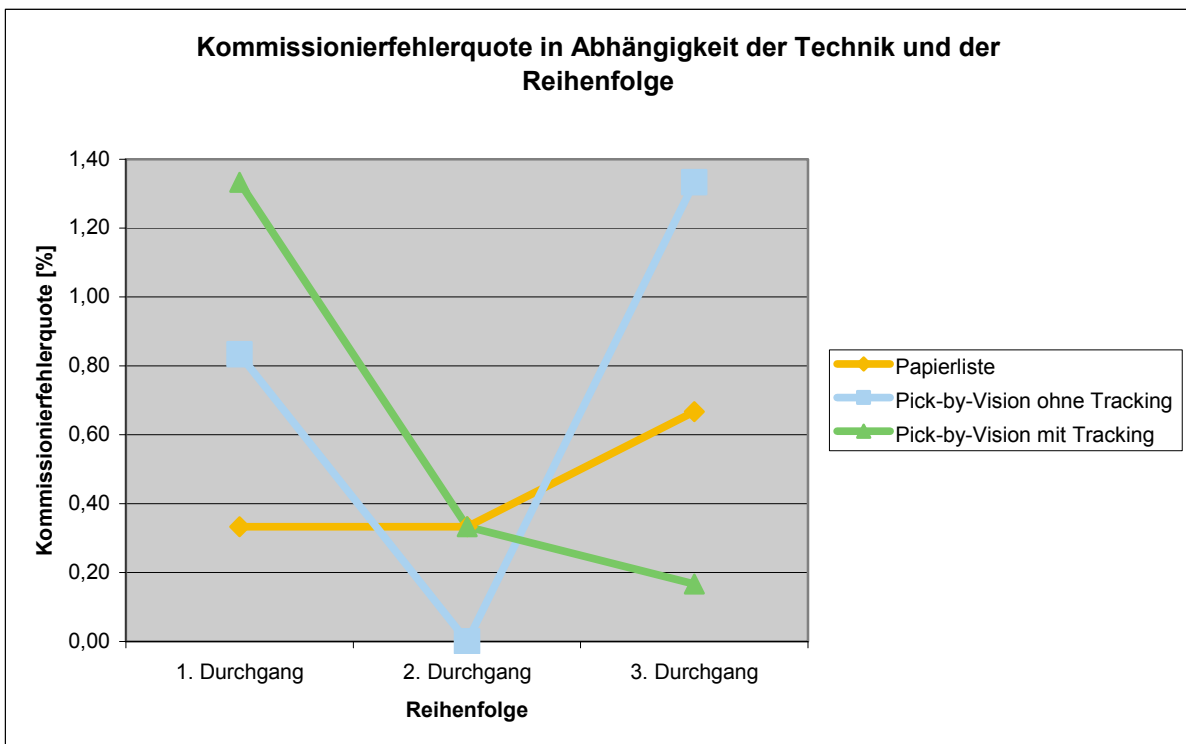


Abbildung 7-14: Kommissionierfehlerquote in Abhängigkeit der Technik und der Reihenfolge

Werden die systematischen Fehler nicht betrachtet, zeigt sich das gleiche Bild, d. h. die Auslassungsfehler aufgrund der Fehlquittierung verteilen sich auf alle Versuchsreihen, unabhängig von der Versuchsdauer bzw. der Reihenfolge der Techniken.

7.4.3 Kommissionierzeit

Die Mittelwerte der Kommissionierzeiten der beiden Verfahren mit Datenbrille sind nahezu gleich (siehe Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16), wobei die Probanden mit Tracking um 0,24 min (1,9 %) schneller waren. Mit der Papierliste waren die Probanden um 1,45 min (10,5 %) bzw. 1,21 min (8,7 %) langsamer. Die schnellste und auch die langsamste Zeit wurden mit der Datenbrille ohne Tracking erreicht (7,77 min und

19,82 min), wobei der Unterschied 260 % beträgt und deswegen auch eine hohe Stichprobenspannweite und Varianz im Vergleich zu den anderen beiden Techniken entsteht. Die Varianz ist bei der Papierliste und dem System mit Tracking nahezu gleich. Die entsprechende Kommissionierleistung beträgt – bei einer im Labortest optimalen Verfügbarkeit und Auslastung von je 100 % – mit der Liste 130, mit Pick-by-Vision ohne Tracking 142 und mit Tracking 145 Pos/h.

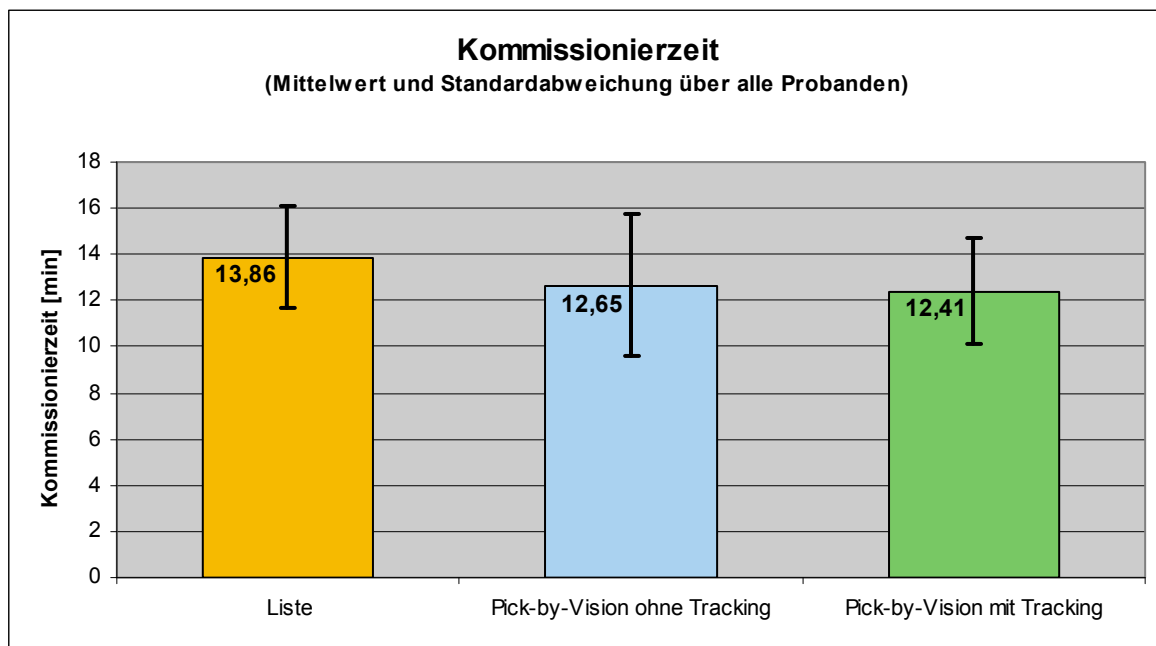


Abbildung 7-15: Kommissionierzeiten (Mittelwert und Standardabweichung über alle Probanden)

Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, dass alle drei Stichproben normalverteilt sind. Nach dem Ausreißertest nach Grubbs muss ein Proband bei Pick-by-Vision mit Tracking genauer betrachtet werden. Da bei der grafischen Auswertung keine eindeutige Zuordnung zu erkennen ist, wird er nicht als Ausreißer behandelt. Die Mittelwerte der Kommissionierzeiten bewegen sich in folgenden Vertrauensintervallen: Liste von 12,79 bis 14,94 min, Pick-by-Vision ohne Tracking von 11,15 bis 14,16 min und Pick-by-Vision mit Tracking von 11,28 bis 13,53 min.

	Quadratsumme	Freiheitsgrade df	Varianz σ^2	Empirischer F-Wert
Treatment	23,13	2	11,57	1,77
Fehler	352,90	54	6,54	
Total	-376,03	56	-6,71	
Kritischer F-Wert				ca. 3,15 ($\alpha = 5\%$)

Tabelle 7-3: Varianzanalyse zu den Kommissionierzeiten

Die Untersuchung der Mittelwerte auf Signifikanz wird mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Der Faktor, der variiert wird, ist die Kommissioniertechnologie. Über alle Probanden beträgt der kritische F-Wert 3,15 und ist somit höher als der empirische Wert von 1,77, so dass kein Unterschied festgestellt wird (siehe Tabelle 7-3).

$H_{0,5}: t_{\text{Liste}} = t_{\text{oTr}} = t_{\text{mTr}} \rightarrow$ nicht verworfen

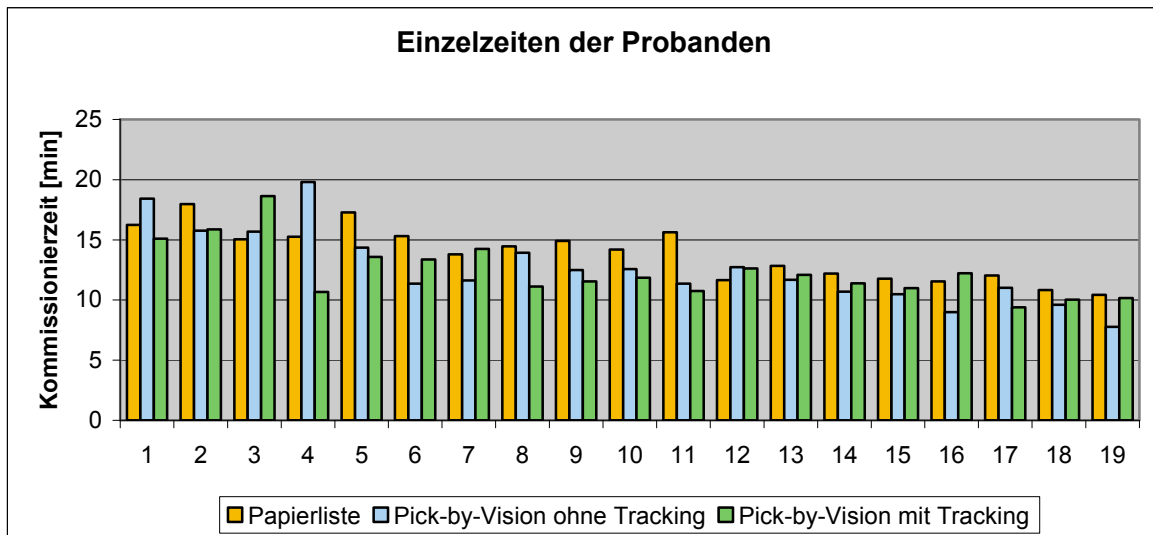


Abbildung 7-16: Einzelzeiten der Probanden (beginnend mit dem kumulativ langsamsten Probanden)

Der Boxplot in Abbildung 7-17 verdeutlicht die Zusammenhänge. Die Papierliste und das System ohne Tracking haben in etwa eine gleich große Streuung (Box, 50 % der Werte liegen darin), während die vom System mit Tracking kleiner ist. Normalerweise wäre für die bekannte Papierliste die kleinste Streuung zu erwarten. Die Stichprobenspannweite ist bei Pick-by-Vision größer (v. a. ohne Tracking). Dies war zu erwarten. Die Mediane liegen bei allen drei Plots nicht in der Mitte. Bei der Liste befindet er sich weiter oben in der Box, bei beiden Pick-by-Vision-Varianten weiter unten. Dies deutet auf eine schiefe Verteilung hin, bei der Liste nach rechts bei den beiden anderen nach links. Bei den beiden Pick-by-Vision-Varianten liegen die meisten Werte unterhalb des Mittelwerts. Ein paar wenige Werte reißen nach oben ab und erhöhen den Mittelwert, d. h. die meisten Probanden kamen sehr schnell sehr gut mit dem System zurecht. Mit Tracking waren zwölf von 19 schneller als der Mittelwert, ohne Tracking waren es ebenfalls zwölf. Bei der Liste waren sowohl neun Probanden

schneller als auch langsamer als der Mittelwert, wobei die neun schnelleren mehr abweichen und die Schiefe erzeugen.

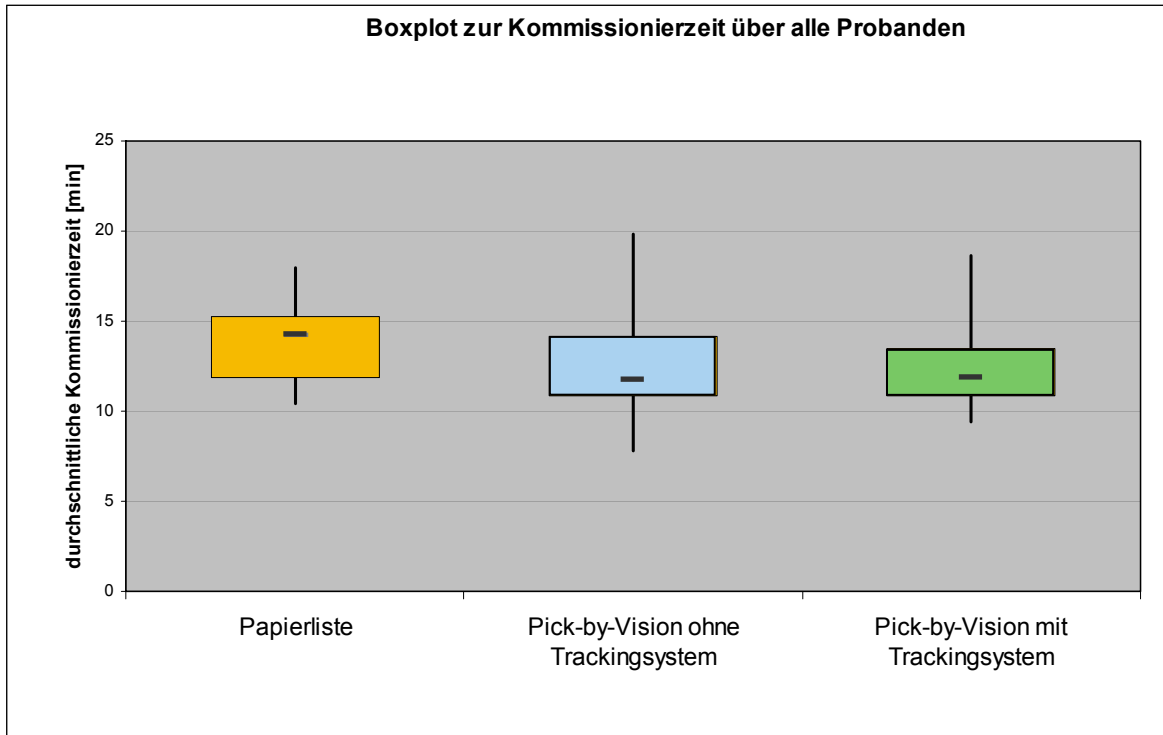


Abbildung 7-17: Boxplot zur Kommissionierzeit über alle Probanden (Boxplot nach [Tuc-77])

Betrachtung der Einzelaufträge 1 bis 6

Beim dritten Auftrag war die Papierliste zweiseitig und somit noch schwieriger zu handhaben. Bei einer Prüfung mit einer ANOVA wird festgestellt, dass ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Kommissionierzeit besteht. Mit einem t-Test für abhängige Stichproben können nun die Techniken untereinander genauer untersucht werden. Zwischen der Papierliste und Pick-by-Vision ohne Tracking besteht kein Unterschied (3,70 zu 3,44 min). Der signifikante Unterschied ist auf den Vergleich der Papierliste zu Pick-by-Vision mit Trackingsystem zurückzuführen (3,70 zu 3,05 min). Zwischen den beiden Techniken mit der Datenbrille besteht kein Unterschied. Eine Erklärung für diesen Effekt gibt es nicht. Da es beim sechsten Auftrag einen hoch signifikanten Unterschied gibt (ANOVA, $\alpha = 1\%$) und dieser zwischen der Liste und dem System ohne Tracking ist, wird diese These nicht unterstützt. Bei allen anderen Aufträgen gibt es keine Unterschiede. Die Techniken unterscheiden sich somit auch bei den Einzelaufträgen nicht.

Kommissionierzeit und 3D- bzw. Kommissioniererfahrung

Bei den acht Probanden mit 3D-Erfahrung zeigt sich bei den beiden Pick-by-Vision-Systemen die gleiche Tendenz: sie waren schneller als die Probanden ohne diese Erfahrung und die Streuung ist geringer (siehe Abbildung 7-18).

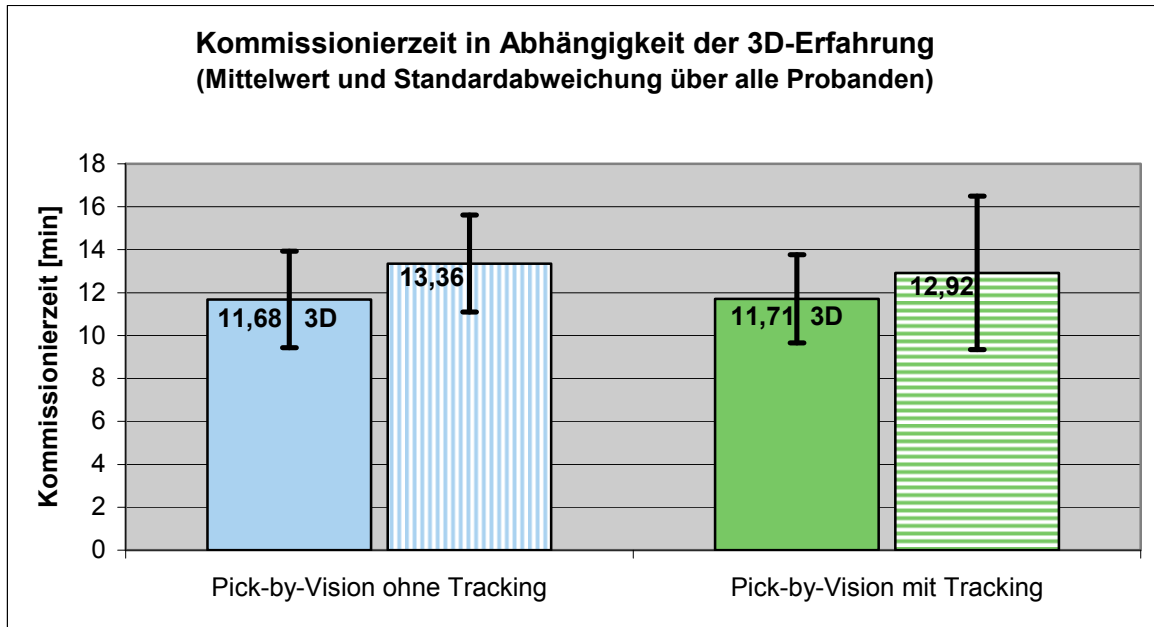


Abbildung 7-18: Kommissionierzeit in Abhängigkeit der 3D-Erfahrung der Probanden (Mittelwerte und Standardabweichung)

Der Unterschied hinsichtlich der 3D-Erfahrung ist bei beiden Techniken mit der Datenbrille nicht unerheblich (Mittelwert: ohne Tracking: 13 %, mit Tracking: 9 %). Ein t-Test zeigt keine Unterschiede der Mittelwerte. Da es sich jeweils aus zwei Teilmengen aus einer Stichprobe handelt, sind dies unabhängige Stichproben (ein Proband – ein Wert) und der einsetzbare F-Test zeigt, dass der Unterschied der Varianzen beim System mit Tracking signifikant ist, während dies beim System ohne Tracking nicht gilt. Im Gegensatz zu $H_{0,6a}$ wird $H_{0,6b}$ verworfen.

$H_{0,6a}: t_{oTr, 3D} = t_{oTr, ohne 3D}$ → nicht verworfen

$H_{0,6b}: f_{mTr, 3D} = f_{mTr, ohne 3D}$ → verworfen

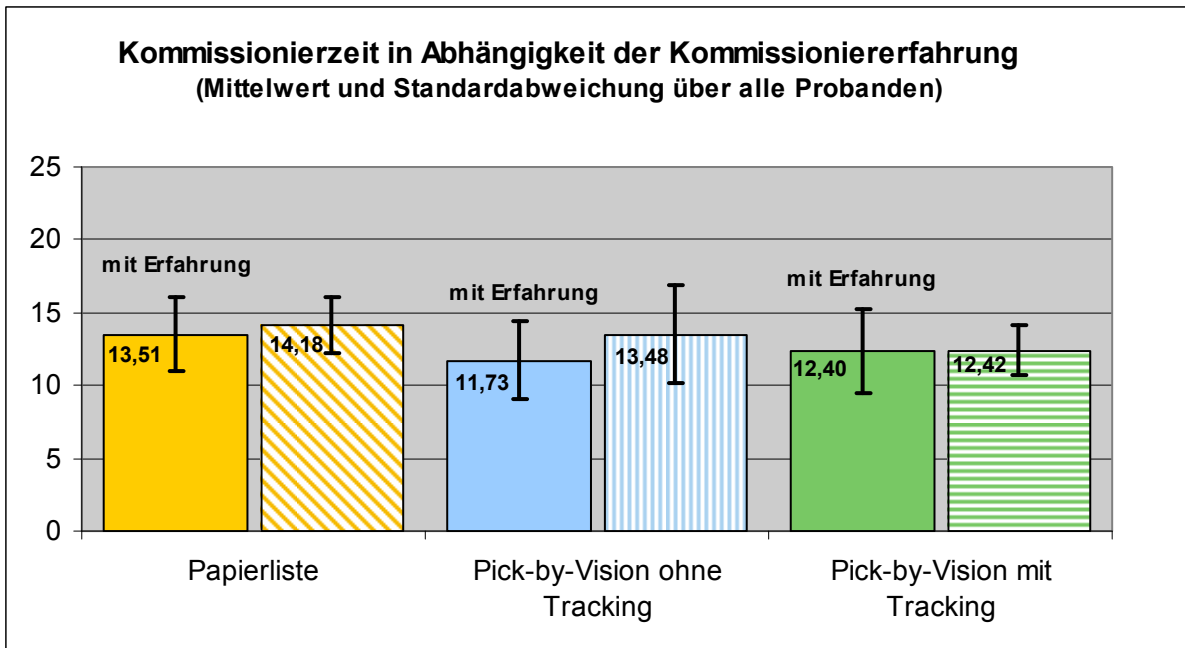


Abbildung 7-19: Kommissionierzeit in Abhängigkeit der Kommissioniererfahrung der Probanden (Mittelwerte und Standardabweichung)

Bei den neun Probanden mit Kommissioniererfahrung ist das Bild ähnlich (siehe Abbildung 7-19). Beim Einsatz von Tracking zeigt sich kein Unterschied. Bei der Kommissionierliste waren sie etwas schneller (5 %) und beim System ohne Tracking noch schneller (13 %). Aber weder ein t-Test (Mittelwerte) noch ein F-Test (Varianzen) zeigen bei beiden Systemen einen signifikanten Unterschied.

$$H_{0, 7a}: t_{\text{Liste, Kom-Erf}} = t_{\text{Liste, ohne Kom-Erf}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$

$$H_{0, 7b}: t_{\text{oTr, Kom-Erf}} = t_{\text{oTr, ohne Kom-Erf}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$

$$H_{0, 7c}: t_{\text{mTr, Kom-Erf}} = t_{\text{mTr, ohne Kom-Erf}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$

Kommissionierzeit und Lerneffekte

Auffallend ist, dass die beiden Techniken mit der Datenbrille bereits ab dem ersten Auftrag etwas schneller sind als die Papierliste (ca. 0,1 min). Der Login benötigt wenig Zeit und hat keine Auswirkungen auf den ersten Auftrag. Interessanter ist die Untersuchung, ob sich die Reihenfolge, in der die Probanden die Techniken ausprobiert haben, auf die Kommissionierzeit auswirkt. Es wurde nicht jede Technik sechsmal als erster, zweiter und dritter Durchgang evaluiert. Aufgrund der 19 Probanden wurde

die Kombination oTr-mTr-L siebenmal getestet. Da die Auswertung mit einer MANOVA erfolgt, wird ein zufällig ausgewählter Proband mit dieser Reihenfolge gestrichen, damit alle Varianten gleich oft vertreten sind. Ein Faktor ist die Variable Technik und der zweite Faktor ist die Variable Reihenfolge. Tabelle 7-4 zeigt die Ergebnisse. Alle überprüften Abhängigkeiten sind nicht signifikant.

	Quadratsumme	Freiheitsgrade df	Varianz σ^2	Empirischer F-Wert
Technik	24,98	2	12,49	2,25
Reihenfolge	15,95	2	7,98	1,44
Interaktion	37,87	4	9,47	1,71
Fehler	249,57	45	5,55	
Total	328,37	53		
Kritischer F-Wert				ca. 4,05

Tabelle 7-4: Varianzanalyse zur Abhängigkeit der Kommissionierzeit von der Reihenfolge der Technik

Die Kommissionierzeit hängt nicht von der Reihenfolge ab, in der die Probanden die Techniken testeten. Dies ist auch in Abbildung 7-20 zu erkennen.

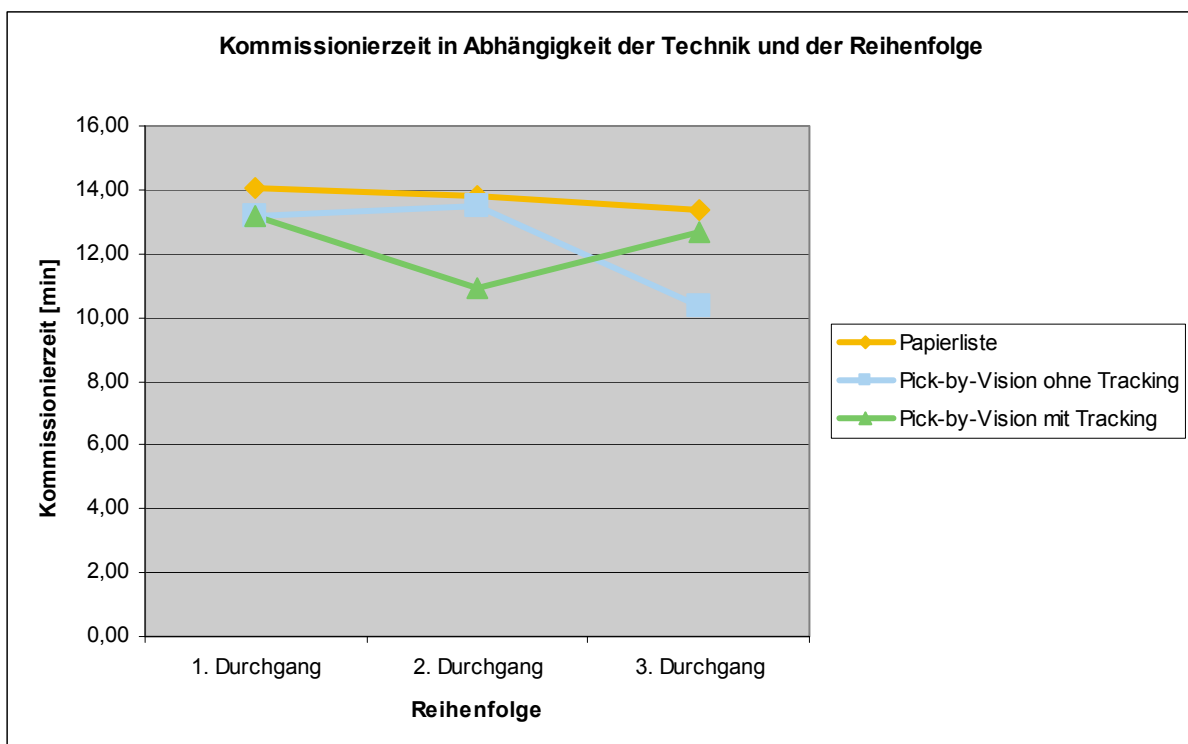


Abbildung 7-20: Kommissionierzeit in Abhängigkeit von der Technik und der Reihenfolge

Nur bei der Papierliste ist ein Sinken der Kommissionierzeit in Abhängigkeit der Testreihenfolge zu beobachten. Beim Einsatz des Trackingsystems fällt die Kommissio-

nierzeit erwartungsgemäß vom ersten zum zweiten Durchgang stark ab, steigt aber zum dritten Durchgang wieder auf das Niveau vom ersten Testlauf an. Bei Pick-by-Vision ohne Tracking ist der Effekt umgekehrt. Die Probanden die das System ohne Tracking als letzten Durchgang nutzen, erzielten die schnellste durchschnittliche Kommissionierzeit.

$H_{0, 8a}: t_{\text{Liste, Durchgang 1}} = t_{\text{Liste, Durchgang 2}} = t_{\text{Liste, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

$H_{0, 8b}: t_{\text{oTr, Durchgang 1}} = t_{\text{oTr, Durchgang 2}} = t_{\text{oTr, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

$H_{0, 8c}: t_{\text{mTr, Durchgang 1}} = t_{\text{mTr, Durchgang 2}} = t_{\text{mTr, Durchgang 3}}$ → nicht verworfen

7.4.4 Subjektive Beanspruchung

In diesem Kapitel werden der NASA TLX, der d2-Beanspruchungstest sowie die offenen Fragen ausgewertet.

Mentale Beanspruchung

Der Nasa TLX Test soll zeigen, ob die Probanden eine unterschiedliche mentale Beanspruchung durch die Techniken hatten. Dazu wird für jede Technik und jeden Probanden der Mittelwert aus den sechs Kriterien gebildet (siehe Abbildung 7-21).

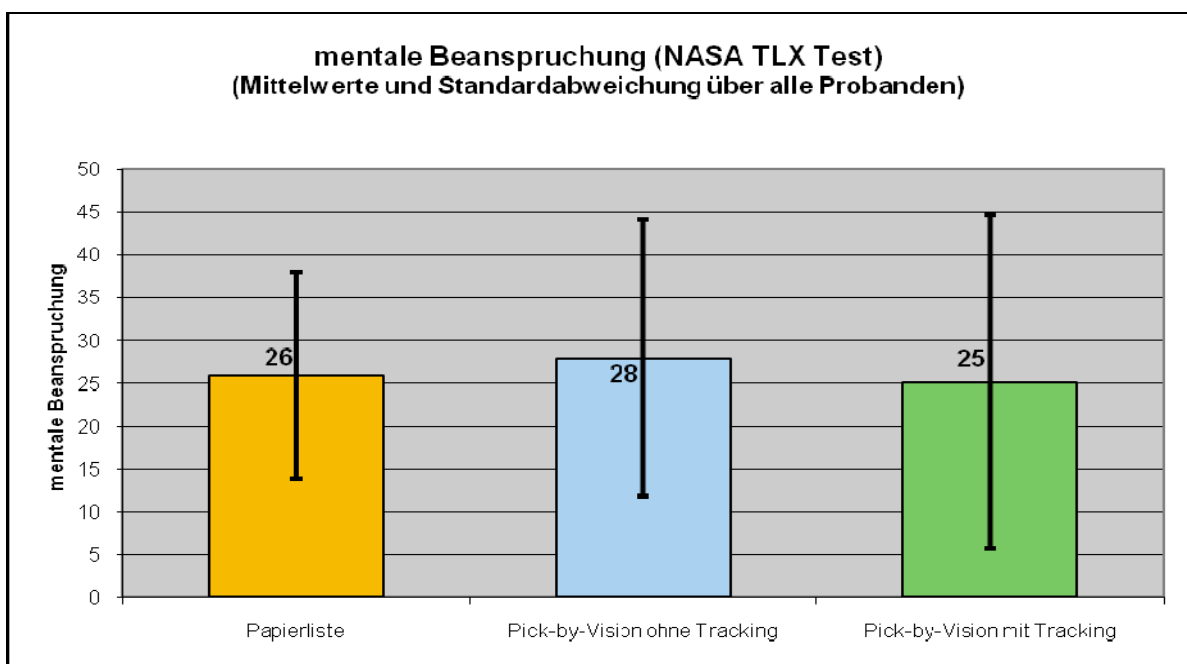


Abbildung 7-21: Mentale Beanspruchung (Mittelwert und Standardabweichung)

Die drei Stichproben für die Techniken sind normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov-Test). Eine ANOVA zeigt keinen signifikanten Unterschied bei der mentalen Beanspruchung auf (siehe Tabelle 7-5). Die Beanspruchung mit Tracking ist sogar etwas geringer, weil eine dynamische Visualisierung weniger ermüdend ist als eine statische, die stets am selben Ort angezeigt wird.

	Quadratsumme	Freiheitsgrade df	Varianz σ^2	Empirischer F-Wert
Treatment	79,63	2	39,81	0,15
Fehler	14111,84	54	261,33	
Total	14191,47	56	253,42	
Kritischer F-Wert				3,17

Tabelle 7-5: ANOVA zur mentalen Beanspruchung der Techniken

Wird die mentale Beanspruchung unabhängig von der Technik sondern nur in Abhängigkeit der fortlaufenden Versuchsdauer betrachtet, gibt es ebenfalls keine signifikanten Unterschiede (Normalverteilung mit Kolmogorov-Smirnov-Test, ANOVA, siehe Tabelle 7-6). Der empirische F-Wert ist zwar etwas höher wie bei der Abhängigkeit von der Technik, aber noch weit unter dem kritischen F-Wert.

	Quadratsumme	Freiheitsgrade df	Varianz σ^2	Empirischer F-Wert
Treatment	940,81	2	470,41	1,91
Fehler	13250,65	54	245,38	
Total	14191,47	56	253,42	
Kritischer F-Wert				3,17

Tabelle 7-6: ANOVA zur mentalen Beanspruchung über die Versuchsdauer

Die Beanspruchung ist am Anfang hoch, geht zurück und steigt am Ende wieder an. Vermutlich sind die Probanden am Anfang noch nervös und so höher belastet. Im zweiten Durchgang kennen sie den Ablauf, fühlen sich sicherer und somit weniger gestresst. Bei der letzten Technik waren die Abläufe bereits bekannt, die Probanden wollen mit der Versuchsreihe fertig werden und sind somit wieder etwas mehr gestresst (siehe Abbildung 7-22).

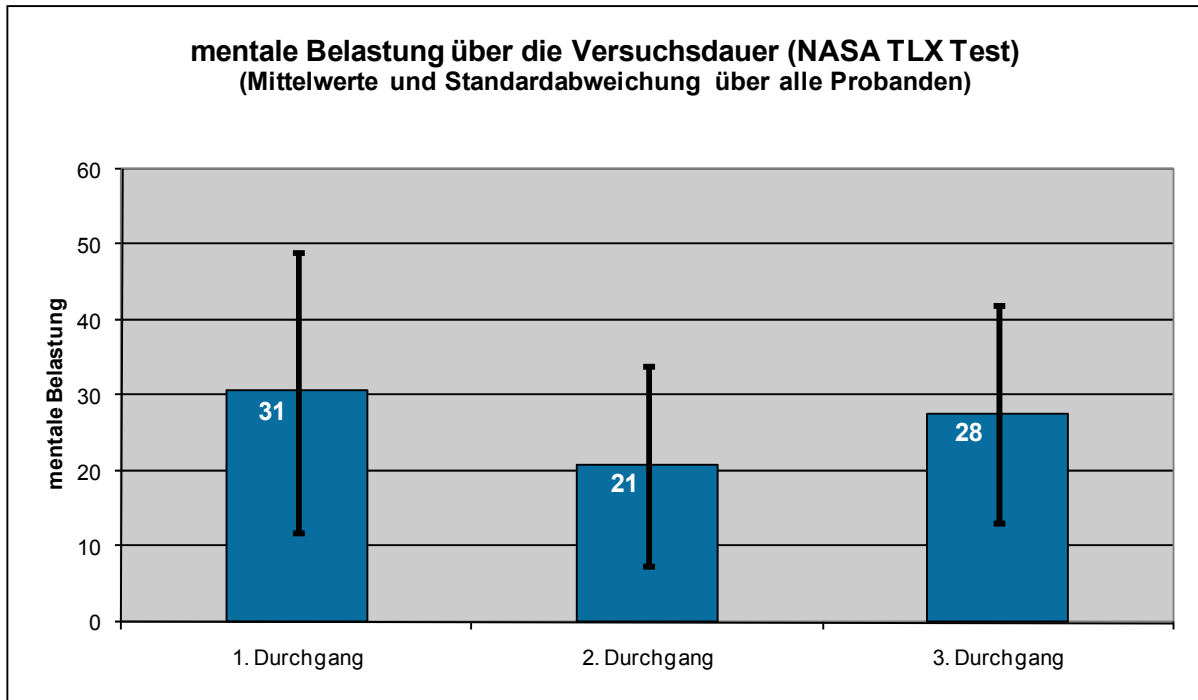


Abbildung 7-22: Mentale Beanspruchung in Abhängigkeit der Versuchsdauer (Mittelwerte und Standardabweichung)

Mit einer MANOVA lässt sich noch untersuchen, wie die beiden Faktoren Technik und Reihenfolge voneinander abhängen (siehe Tabelle 7-7).

	Quadratsumme	Freiheitsgrade df	Varianz σ^2	Empirischer F-Wert
Technik	773,44	2	386,72	2,07
Reihenfolge	730,33	2	365,17	1,96
Interaktion	1314,22	4	328,56	1,76
Fehler	8387,50	45	186,39	
Total	11205,50	53		
Kritischer F-Wert				ca. 4,05

Tabelle 7-7: MANOVA zur mentalen Beanspruchung in Abhängigkeit der Reihenfolge der Techniken

Es zeigt sich das gleiche Ergebnis. Die mentale Beanspruchung nimmt unabhängig von der Technik nach dem ersten Durchgang ab und steigt bei der Liste und beim System mit Tracking wieder an. Nur wenn die letzte Technik das System ohne Tracking war, ging die mentale Beanspruchung leicht zurück (siehe Abbildung 7-23). Alle Unterschiede bei der mentalen Beanspruchung sind aber nicht signifikant.

$H_{0,9}: TLX_{Liste} = TLX_{oTr} = TLX_{mTr} \rightarrow$ nicht verworfen
--

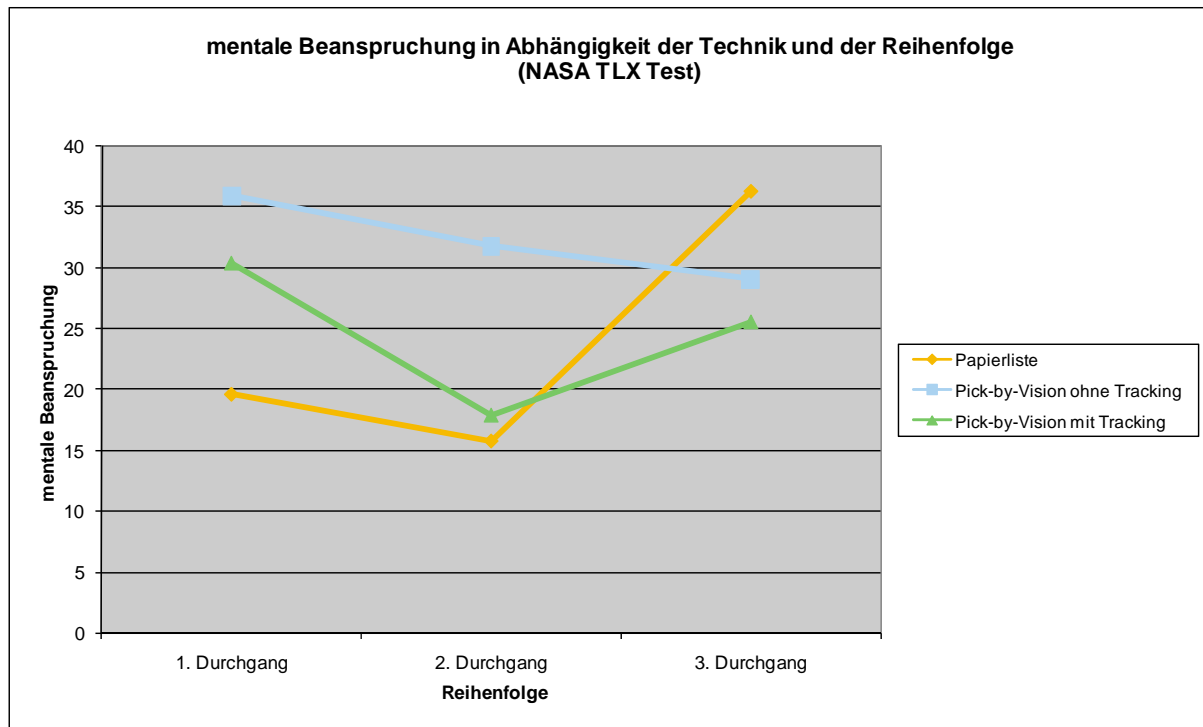


Abbildung 7-23: Mentale Beanspruchung mit den einzelnen Techniken in Abhängigkeit der Reihenfolge der Techniken

Konzentration

Die Konzentrationsleistung wurde mit dem d2-Test gemessen. Zunächst wird untersucht, wie sich die Konzentration in Abhängigkeit der vier Durchgänge (vor Beginn und nach jeder Technik) auswirkt (siehe Abbildung 7-24). Dabei zeigt sich, dass die durchschnittliche Anzahl an Fehlern im d2-Test mit der Anzahl der Durchgänge deutlich abnimmt, d. h. die Konzentration nahm erstaunlicherweise zu. Dieses Ergebnis resultiert vermutlich mehr aus Lerneffekten, denn die Probanden kannten den d2-Test von Durchgang zu Durchgang immer besser. Wird die Fehleranzahl im d2-Test in Abhängigkeit der Uhrzeit betrachtet (siehe Abbildung 7-25), ist ein Trend zu einer höheren Fehleranzahl am Nachmittag zu erkennen. Dies ist kein genereller Trend, aber die drei Probanden mit weit überdurchschnittlicher Fehleranzahl führten ihre Versuchsreihe am Nachmittag durch. Vor allem der Proband mit durchschnittlich 41 Fehlern ist auffällig, wird aber in den weiteren Untersuchungen mitbetrachtet.

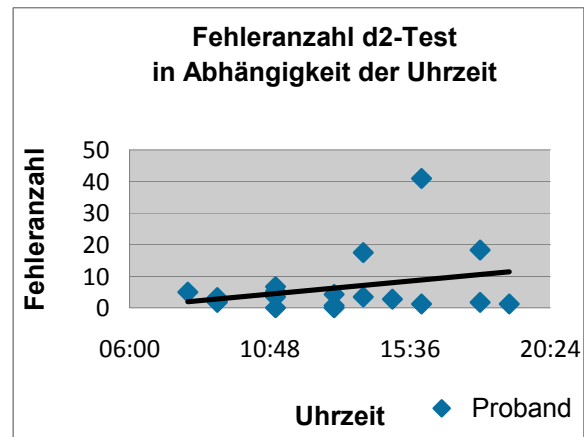
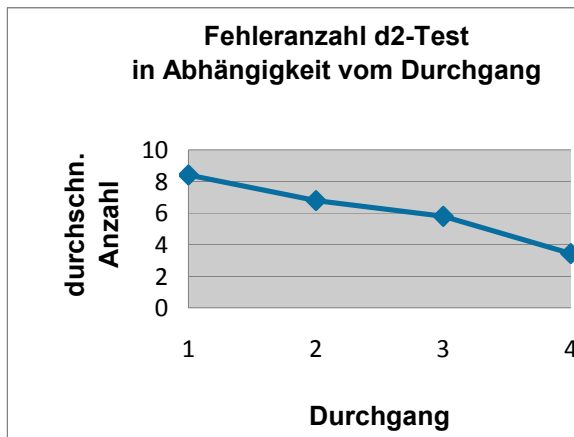


Abbildung 7-24: Konzentration in Abhängigkeit der Durchgänge Abbildung 7-25: Konzentration in Abhängigkeit der Uhrzeit

Ein weiterer Aspekt ist der Einfluss der Informationsbereitstellungstechnologie auf die Konzentration. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen Fehleranzahl beim d2-Test geordnet nach der Technik, nach der er angewandt wurde, ist kein Unterschied zu erkennen. Beim d2-Test nach dem Durchgang mit der Papierliste machten die Probanden 5,38 und nach Pick-by-Vision ohne Tracking 5,40 Fehler. Beim System mit Tracking ist der Wert mit 5,95 unwesentlich höher.

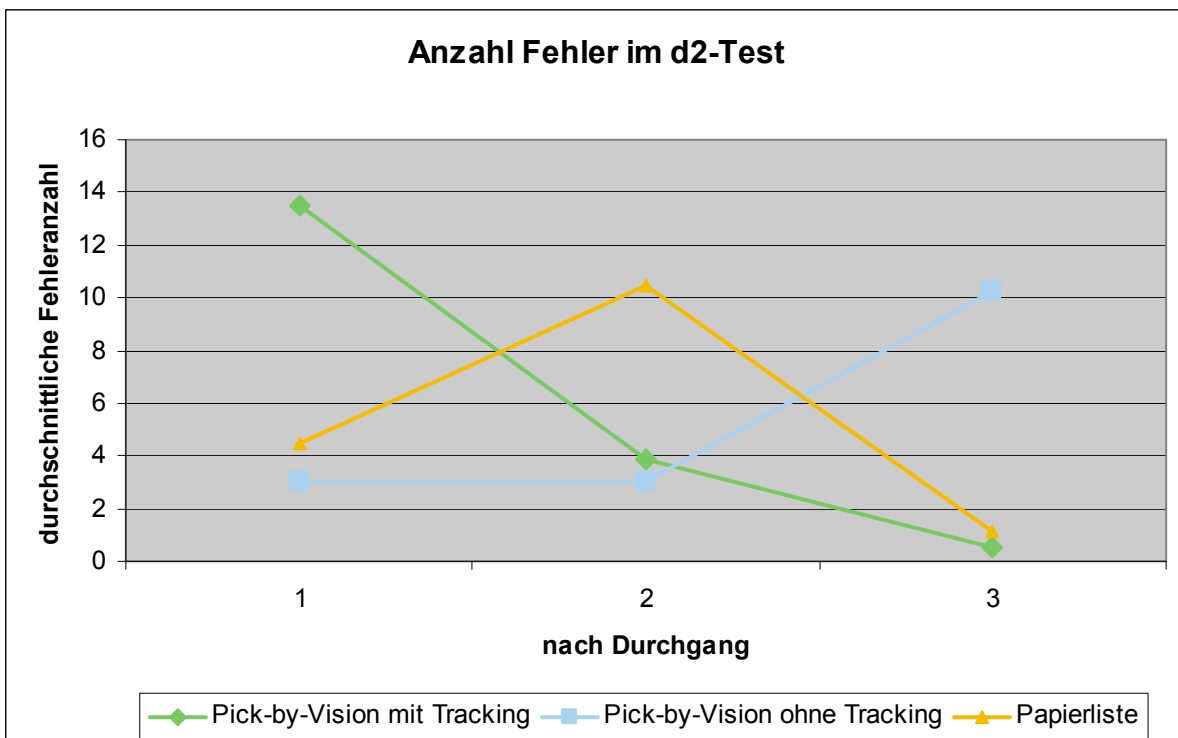


Abbildung 7-26: Fehleranzahl im d2-Test in Abhängigkeit der Technik und des Durchgangs

Im nächsten Schritt wird untersucht, wie hoch die Fehlerrate in Abhängigkeit der Technik und der Reihenfolge der Durchgänge ist. Die Stichproben sind nicht normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov-Test), so dass eine MANOVA nicht verwendet werden kann. Die Zusammenhänge lassen sich aber auch grafisch gut erkennen (siehe Abbildung 7-26). Bei der Papierliste steigt die Fehlerzahl und nimmt zum Ende hin stark ab. Beim System ohne Tracking verharrt sie zunächst auf einem niedrigen Niveau, um dann zum Ende hin stark anzusteigen. Beim System mit Tracking geht die Fehlerrate von einem hohen Niveau am Anfang auf ein sehr niedriges Niveau zurück. Die Erklärung für die drei hohen Werte ist, dass der Proband mit weit überdurchschnittlicher Fehlerrate seine Versuche in der Reihenfolge mTr-PL-oTr durchführte und somit den Durchschnitt nach oben zieht. Zusammenfassend lässt sich kein Einfluss der Informationsbereitstellungstechnologie auf die Konzentration feststellen.

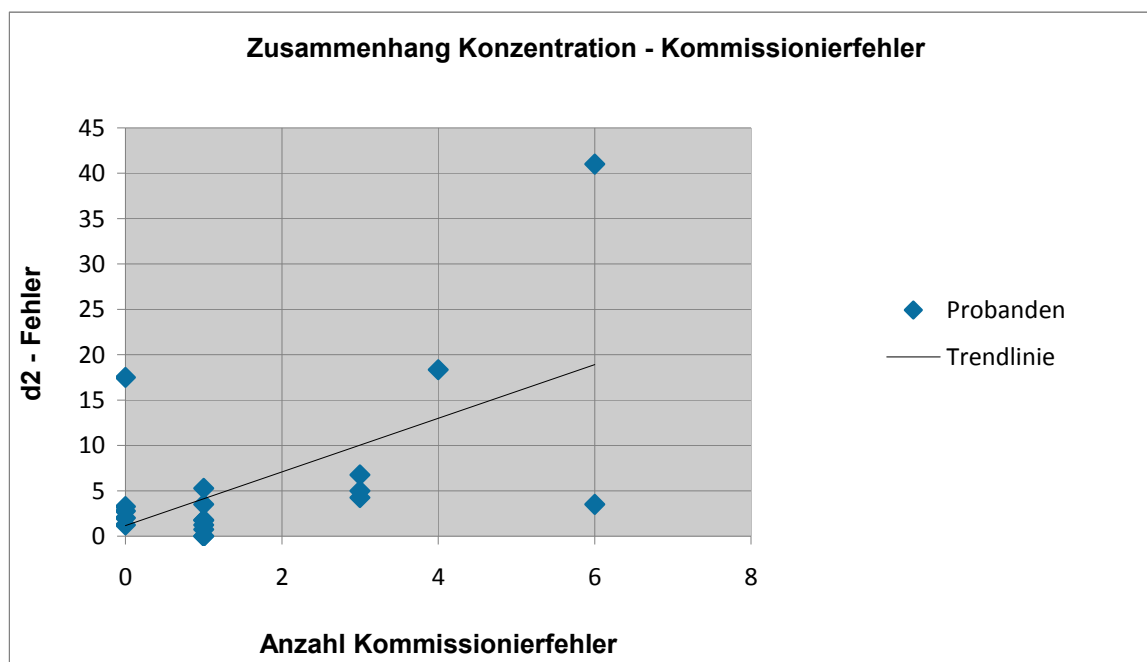


Abbildung 7-27: Zusammenhang zwischen Konzentration und Kommissionierfehler

Die Konzentration hat einen Einfluss auf die Leistung und vor allem auf die Fehlerquote des Probanden. Werden diese beiden Größen gegenübergestellt, ist in der grafischen Auswertung ein klarer Trend zu erkennen (siehe Abbildung 7-27). Je unkonzentrierter die Probanden waren, d. h. je mehr Fehler sie im d2-Test begingen, desto höher war die Anzahl der Kommissionierfehler. Dem Probanden mit 41 Fehlern im d2-Test unterliefen mit Abstand auch die meisten Fehler beim Kommissionieren unabhängig der eingesetzten Kommissioniertechnologie.

$$H_{0,10}: d2_{\text{Liste}} = d2_{\text{oTr}} = d2_{\text{mTr}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$

Verdeckung des FoVD

Eine Verdeckung der realen Welt durch die virtuellen Daten wurde kaum bemängelt und es konnten keine Unterschiede zwischen dem Tunnel und der Textvariante erkannt werden (siehe Abbildung 7-28). Die Variante ohne Tracking wird besser eingeschätzt (ca. 7 %), was auch der Realität entspricht, denn es wurden nur in einem kleinen Bereich des FoVD virtuelle Daten angezeigt. Auch die Streuung ist in beiden Fällen nahezu gleich. Die Nullhypothese $H_{0,11}$ wird nicht verworfen.

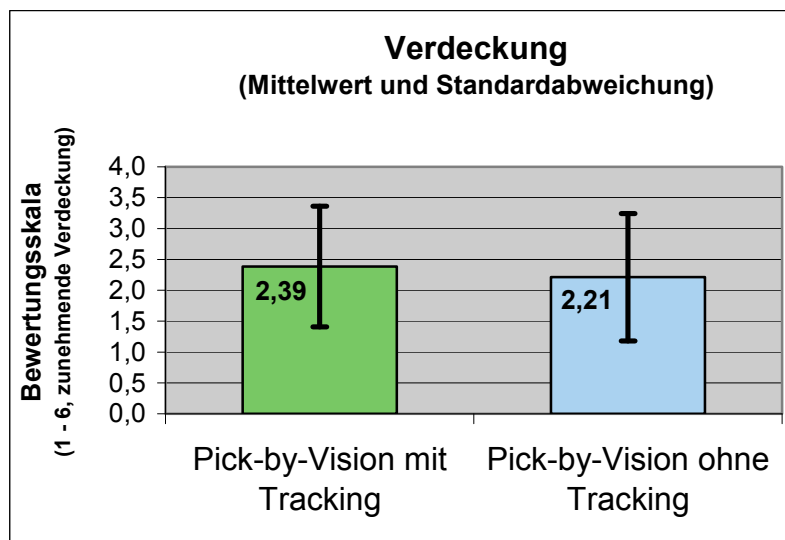
$$H_{0,11}: V_{\text{oTr}} = V_{\text{mTr}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$


Abbildung 7-28: Einschätzung der Verdeckung durch die Probanden

Beschwerden

Bei den physischen Beschwerden ergibt sich ein ähnliches Bild. Es traten bei beiden Techniken mit der Datenbrille kaum Beschwerden auf und die Mittelwerte unterscheiden sich um nur ca. 3 % (siehe Abbildung 7-29). Die Standardabweichungen sind nahezu identisch, so dass dies nicht weiter untersucht wird.

$$H_{0,12}: kB_{\text{oTr}} = kB_{\text{mTr}} \rightarrow \text{nicht verworfen}$$

Die physischen Beschwerden werden aus drei Fragen ermittelt, die bei separater Betrachtung bei der Frage nach Orientierungs- und Gleichgewichtsstörungen einen Unterschied aufzeigten (Mittelwerte von 18 % zugunsten des Systems ohne Tracking). Die beiden Stichproben sind nach einem Kolmogorov-Smirnov-Test nicht

normalverteilt. Deshalb erfolgt die Untersuchung mit einem Wilcoxon-Rangsummen-Test, der aber keine Signifikanz aufzeigt. Der Unterschied kommt von zwei Probanden, die das System ohne Tracking sehr gut und das mit Tracking sehr schlecht bewertet haben. Beide zeigten aber mit beiden AR-Systemen gute Leistungen.

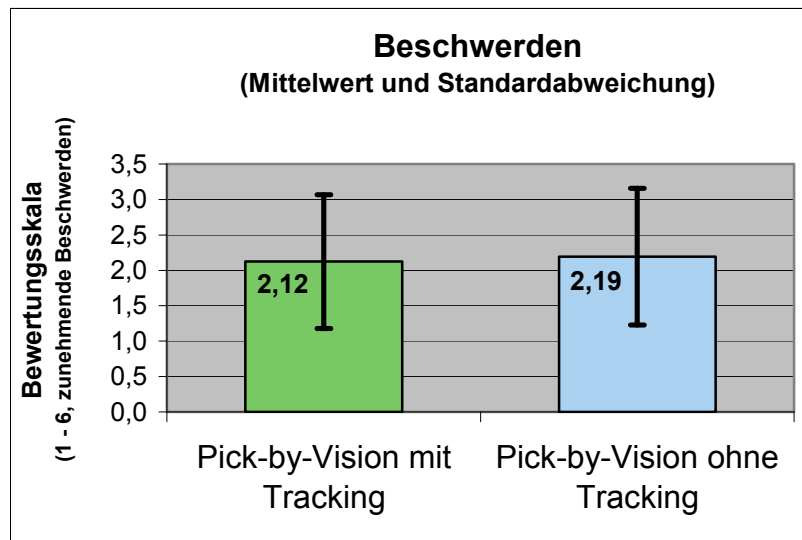


Abbildung 7-29: Beschwerden der Probanden

Persönliche Einschätzung

Mit welcher Methode würden Sie am liebsten arbeiten? Das System mit Tracking hatte den höchsten Neuigkeitswert und begeisterte die Probanden (siehe Abbildung 7-30). Außerdem zeigte der Tunnel direkt auf das Lagerfach und es musste nicht der Lagerplatz in Textform in das reale Lager transformiert werden.

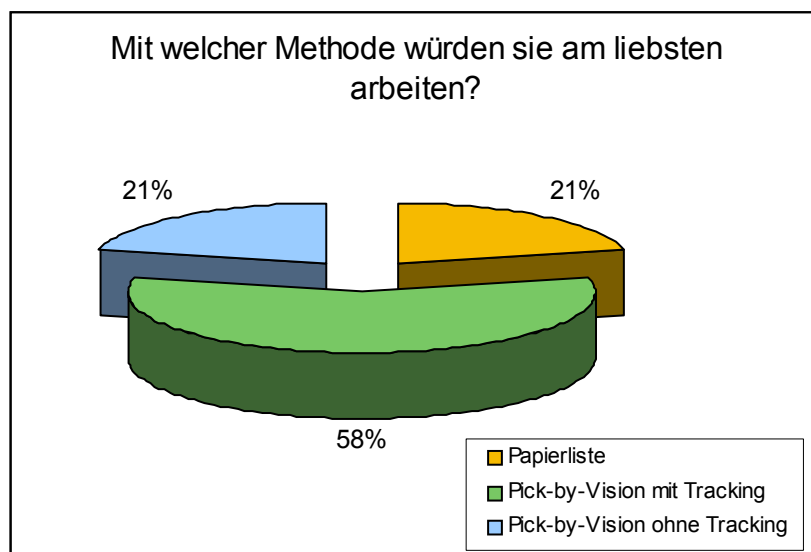


Abbildung 7-30: Mit welcher Methode würden sie am liebsten arbeiten?

Mit welcher Methode würden sie länger arbeiten wollen? Trotz der Begeisterung für die neue Technologie, würde die Hälfte aller Probanden lieber mit der Papierliste arbeiten, wenn sie über einen längeren Zeitraum kommissionieren müssen (siehe Abbildung 7-31). Dies liegt vermutlich daran, dass sie durch die noch nicht optimal ausgelegten Pick-by-Vision-Systemen Beschwerden befürchten. Das Ergebnis bestätigt die Aussagen aus anderen Untersuchungen (siehe Kapitel 5.2.2).

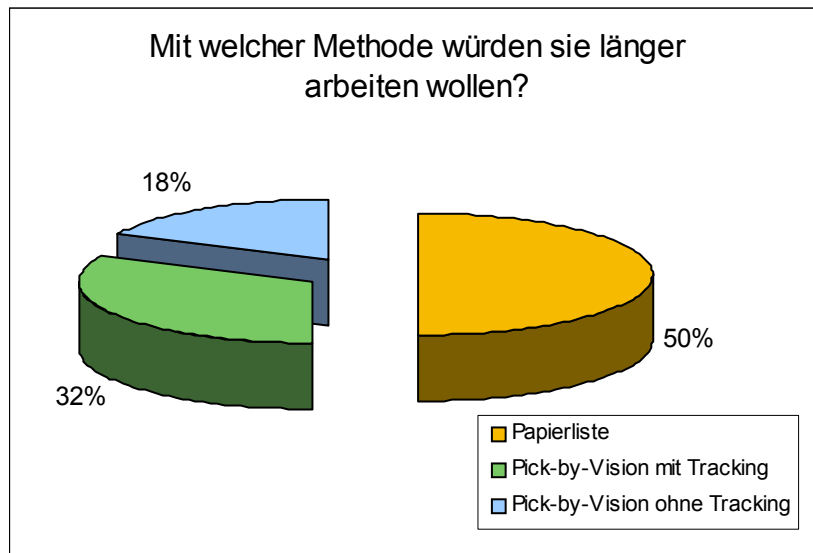


Abbildung 7-31: Mit welcher Methode würden sie länger arbeiten wollen?

Mit welcher Methode hatten sie ihrer Meinung nach die beste Zeit? Nur 65 % schätzten sich richtig ein (siehe Abbildung 7-32). Die meisten Fehleinschätzungen kamen zustande, weil die Probanden dachten, sie wären mit der Liste am schnellsten.

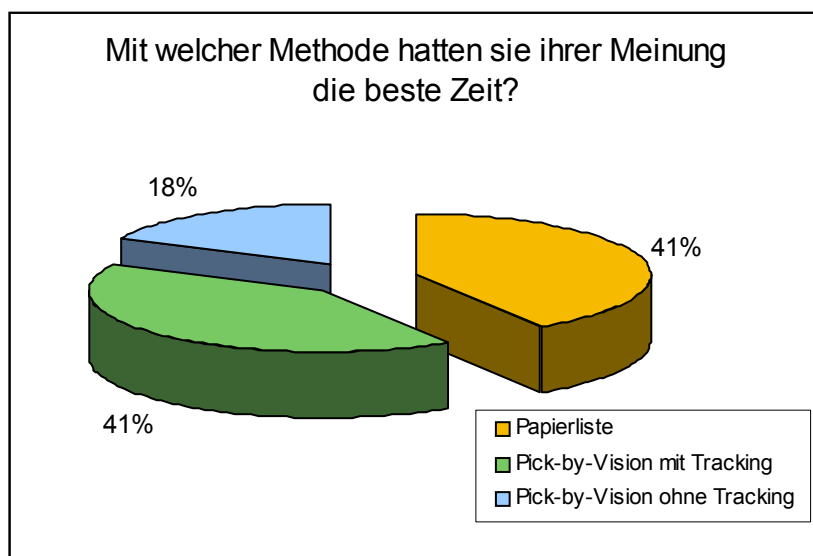


Abbildung 7-32: Mit welcher Methode hatten sie ihrer Meinung nach die beste Zeit?

Offene Fragen

Nur zwei Probanden empfanden das Tragen des Rechners als störend, die Bedienung mit dem Dreh-/Drückknopf drei. Bei der Interaktion war die fehlende „Zurück“-Funktion für drei Probanden ärgerlich. Dies waren wohl Probanden, die das Überspringen der Position bemerkten und nicht mehr korrigieren konnten. Bei Pick-by-Vision ohne Tracking wurde am meisten Kritik geübt. Sechs Probanden fanden das Fokussieren auf die Artikelnummer schwierig. Dies lag daran, dass diese zu weit oben und in einer zu kleinen Schrift angezeigt wurde, was ebenfalls sechs Probanden monierten. Da in der Mitte des FoVD viel Platz ist, könnte die Positionsinformation dort stehen oder eine Liste angezeigt werden. Bei dem System mit Tracking gaben nur drei Probanden an, dass die Suche mit dem Kanal gewöhnungsbedürftig ist und lange dauert. Ebenso viele Probanden sagten, die Lagerfächer durch den Tunnel leichter gefunden zu haben. Der Tragekomfort des Systemträgers wurde von mehreren Probanden bemängelt. Vier Probanden gaben an, dass die Augen am Anfang trüben und es für sie eine Anstrengung war. Als Vorteil gegenüber der Liste erkannten vier Probanden, dass die Hände frei waren. Nur ein Proband würde sich wünschen die Entnahmemenge zu bestätigen, ein weiterer würde ein festes Raster beim Dreh-/Drückknopf bevorzugen, so dass dieser sich nicht leicht verstellen kann.

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Evaluierung

Tabelle 7-8 zeigt eine Übersicht über die Ergebnisse der Auswertung hinsichtlich der Kommissionierfehler. Die Nullhypothese $H_{0,1}$, dass kein Unterschied bei der Kommissionierfehlerquote zu erkennen ist, wird bestätigt. 3D-Erfahrung hat einen positiven Einfluss auf das System mit Tracking, so dass $H_{0,2b}$ verworfen wird, während beim System ohne Tracking kein Unterschied zu erkennen ist. $H_{0,2a}$ wird ebenso nicht verworfen wie $H_{0,3a}$, $H_{0,3b}$ und $H_{0,3c}$, weil kein Einfluss der Kommissioniererfahrung auf das System ersichtlich ist. Ein Einfluss von Lerneffekten ist statistisch nicht nachzuweisen, so dass die Nullhypothesen $H_{0,4a}$, $H_{0,4b}$ und $H_{0,4c}$ nicht verworfen werden. Es ist allerdings erkennbar, dass die Fehleranzahl beim System mit Tracking kontinuierlich abnimmt, was an der direkten Führung mit dem virtuellen Tunnel zum Lagerfach liegt.

	Papierliste	Pick-by-Vision ohne Tracking	Pick-by-Vision mit Tracking
durchschnittliche Anzahl	0,42	0,68 (0,37)	0,63 (0,21)
Fehler insgesamt	8	13 (7)	12 (4)
durchschnittliche Fehlerquote [%]	1,40	2,23 (1,23)	2,11 (0,70)
Median	0	0	0
Minimum	0	0	0
Maximum	3	4 (3)	3 (2)
Varianz	0,59	1,45 (0,58)	0,69 (0,29)
Standardabweichung	0,77	1,20 (0,76)	0,83 (0,54)
Vertrauensintervall Mittelwert [%]	0,77 - 2,23	1,46 - 3,33	1,30 - 3,09
Normalverteilung	nein	nein	nein
Ausreißer	nicht möglich, keine Normalverteilung		
Signifikanztest Mittelwerte ($H_{0,1}$)	kein signifikanter Unterschied		
Einfluss 3D-Erfahrung (Mittelwerte)	-	nicht signifikant ($H_{0,2a}$)	nicht signifikant
Einfluss 3D-Erfahrung (Varianz)	-	-	signifikant zugunsten 3D-Erfahrung ($H_{0,2b}$)
Einfluss der Kommissioniererfahrung ($H_{0,3a}$, $H_{0,3b}$, $H_{0,3c}$)	kein ersichtlicher Einfluss bei Vergleich der Mittelwerte und Varianzen (soweit möglich) (zu wenige Fehler)		
Einfluss Reihenfolge der Kommissioniertechnologien	kein Einfluss ($H_{0,4a}$)	kein Einfluss ($H_{0,4b}$)	fällt zum Ende hin ($H_{0,4c}$)

Tabelle 7-8: Zusammenfassung der Kommissionierfehler

Bei der Kommissionierzeit zeigt sich ein ähnliches Bild (siehe Tabelle 7-9). Die Mittelwerte unterscheiden sich nicht signifikant, so dass $H_{0,5}$ nicht verworfen wird. Die 3D-Erfahrung hat einen positiven Einfluss auf die Zeiten beim System mit Tracking, so dass $H_{0,6b}$ verworfen wird, während auf das System ohne Tracking ebenso kein Einfluss zu erkennen ist wie durch die Kommissioniererfahrung oder die Lerneffekte. Die Nullhypothesen $H_{0,6a}$, $H_{0,7a}$, $H_{0,7b}$, $H_{0,7c}$, $H_{0,8a}$, $H_{0,8b}$ und $H_{0,8c}$ werden nicht verworfen.

	Papierliste	Pick-by-Vision ohne Tracking	Pick-by-Vision mit Tracking
Durchschnitt [min]	13,86	12,65	12,41
Kommissionierleistung [Pos/h]	129,83	140,94	145,08
Kommissionierleistung [EE/h]	271,34	294,56	303,22
Median [min]	14,20	12,09	11,85
Minimum [min]	10,43	7,77	9,40
Maximum [min]	17,98	19,82	18,65

7 Evaluierung in einem Labortest

	Papierliste	Pick-by-Vision ohne Tracking	Pick-by-Vision mit Tracking
Varianz	4,84	9,49	5,27
Standardabweichung	2,20	3,08	2,30
Vertrauensintervall Mittelwert [min]	12,79 - 14,94	11,15 - 14,16	11,28 - 13,53
Normalverteilung	ja	ja	ja
Ausreißer	0	0	0
Signifikanztest Mittelwerte ($H_{0,5}$)	keine Signifikanz		
Differenz zwischen schnellsten und langsamsten Probanden [min]	7,5 (42 %)	12 (61 %)	9,5 (50 %)
Einfluss 3D-Erfahrung (Mittelwert)	kein ersichtlicher Einfluss bei Vergleich der Mittelwerte		
Einfluss 3D-Erfahrung (Varianz)	-	kein Unterschied ($H_{0,6a}$)	signifikanter Unterschied ($H_{0,6b}$)
Einfluss der Kommissioniererfahrung ($H_{0,7a}$, $H_{0,7b}$, $H_{0,7c}$)	kein ersichtlicher Einfluss bei Vergleich der Mittelwerte		
Einfluss Reihenfolge der Kommissioniertechnologien ($H_{0,8a}$, $H_{0,8b}$, $H_{0,8c}$)	kein ersichtlicher Einfluss bei Vergleich der Mittelwerte		

Tabelle 7-9: Zusammenfassung der Kommissionierzeit

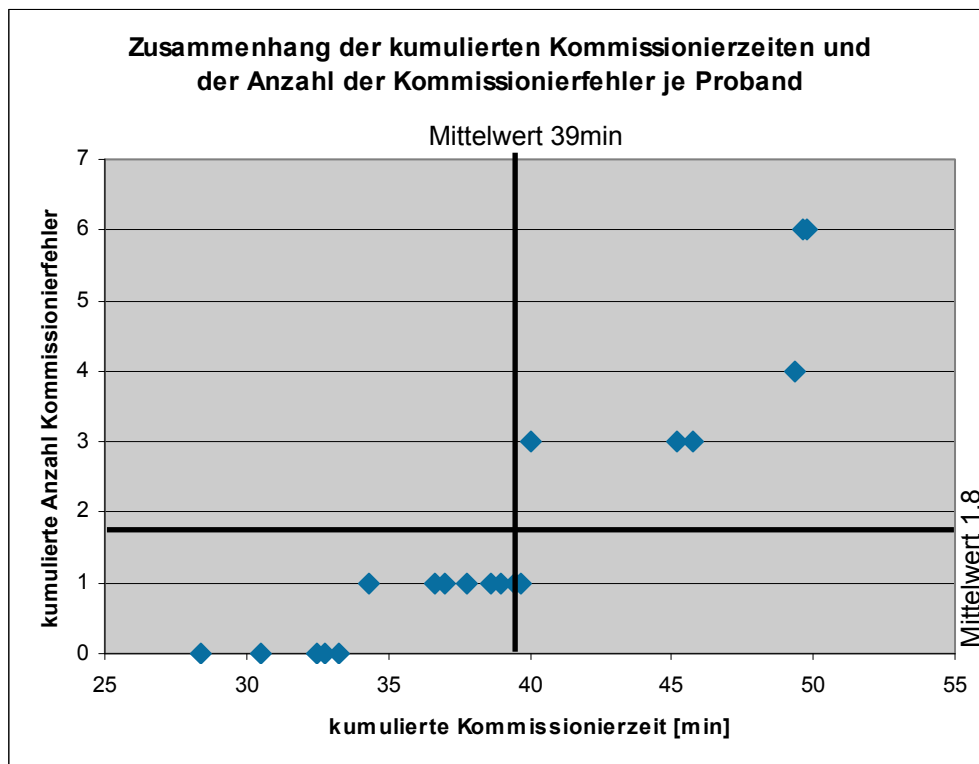


Abbildung 7-33: Zusammenhang Kommissionierfehler und Kommissionierzeit

Abbildung 7-33 stellt die kumulierte Anzahl Kommissionierfehler und die kumulierte Kommissionierzeit der einzelnen Probanden gegenüber. Es ist zu erkennen, dass die Probanden mit überdurchschnittlich vielen Fehlern auch überdurchschnittlich länger

brauchten. Im Labortest zeigte sich auch, dass die Probanden aus der Industrie sorgfältiger arbeiten, weil sie wissen, welche Auswirkungen Kommissionierfehler haben. Sie benötigten einerseits deshalb mehr Zeit, und andererseits, weil sie wissen, dass in der Praxis über eine Schicht von acht Stunden kommissioniert wird.

Bei der subjektiven Beanspruchung wurde in keiner der Untersuchungen ein signifikanter Unterschied aufgedeckt (siehe Tabelle 7-10), wodurch die Nullhypothesen $H_{0,9}$, $H_{0,10}$, $H_{0,11}$ und $H_{0,12}$ nicht verworfen werden. Dies spricht generell für die Systeme mit Datenbrille, da die subjektive Beanspruchung nicht höher ist als mit einer einfachen und bekannten Papierliste. Es ist außerdem ein interessanter, indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen der Konzentration und den Kommissionierfehlern zu erkennen. Die Verdeckung des FoVD durch den Tunnel im System mit Tracking wurde auf einem gleichen Level als nicht störend empfunden wie die Anzeige der Position am oberen Rand beim System ohne Tracking.

	Papierliste	Pick-by-Vision ohne Tracking	Pick-by-Vision mit Tracking
mentale Beanspruchung ($H_{0,9}$)	kein signifikanter Unterschied bei der mentalen Beanspruchung		
Konzentration ($H_{0,10}$)	kein signifikanter Unterschied in der Konzentration		
Verdeckung des FoVD ($H_{0,11}$)	-	kein signifikanter Unterschied	
Beschwerden ($H_{0,12}$)	kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Beschwerden		

Tabelle 7-10: Einfluss auf die subjektive Beanspruchung

Bei der persönlichen Einschätzung zeigt sich, dass die Probanden zwar am liebsten mit dem System mit Tracking arbeiten, aber die Papierliste dann doch für längeres Arbeiten bevorzugt würden. Bei der Einschätzung ihrer persönlichen Leistung unterschätzen viele, dass sie mit der Datenbrille schneller waren. Die Ergonomie der Hardware wurde kaum bemängelt, obwohl es sich um einen prototypenhaften Aufbau handelte. Vor allem die zu kleine und zu weit oben angeordnete Darstellung der Auftragsdaten beim System ohne Tracking und der fehlende „Zurück“-Button wurden bemängelt. Hier gilt es, Optimierungen vorzunehmen, so dass zum einen die Daten beim System mit Tracking besser zu lesen sind und der systematische Fehler des Überblickens von Positionen nicht mehr auftritt. Zudem ist darüber nachzudenken, wie Mengenfehler vermieden werden können. Dies könnte durch den Umstieg auf Spracheingabe erfolgen, die es ermöglicht, durch Eingabe der Entnahmemenge Fehler zu vermeiden [Gün-09].

8 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

In diesem Kapitel erfolgt eine technisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Pick-by-Vision. Dazu wird zunächst eine MTM-Analyse mit den gleichen Randbedingungen wie beim Labortest durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich denen aus der empirischen Untersuchung gegenüberstellen. Anschließend wird aus allen Erkenntnissen der Untersuchungen in dieser Arbeit eine wirtschaftliche Analyse abgeleitet.

8.1 Vergleich durch MTM-Analyse

Für den theoretischen Vergleich der Kommissionierzeit von Pick-by-Vision mit anderen Kommissioniertechniken wird das MTM-Verfahren verwendet [Bok-06]. Dies ist ein System vorherbestimmter Zeiten, d. h. dass Soll-Zeiten für das Ausführen von Vorgangselementen bestimmt werden können, die vom Menschen voll beeinflussbar sind. Mit inhaltlich und zeitlich definierten Prozessbausteinen lassen sich systematisch gegliederte Arbeitsabläufe bewerten. Dabei werden Planungs- und Ausführungsanalysen unterschieden. Bei der Ausführungsanalyse wird ein bestehendes System anhand von z. B. Videoaufnahmen analysiert und Verbesserungspotenziale abgeleitet. Es gibt verschiedene MTM-Verfahren, die alle spezielle Einsatzbereiche haben. Der MTM-Logistik-Baukasten eignet sich nicht für diesen Anwendungsfall, weil er v. a. Tätigkeiten unter Einsatz von Flurförderzeugen sowie Verpackungstätigkeiten beschreibt. Das MTM-1-Verfahren ist das genaueste und die Vorgänge werden aus Grundbewegungen wie Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen aufgebaut. Der Ablauf wird damit exakt beschrieben und deswegen eignet sich MTM-1 besonders für sich wiederholende Vorgänge wie in der Serienfertigung. Bei weiteren Baukästen werden die Grundbausteine zusammengefasst und somit dem Werker mehr individuelle Freiräume bei der Ausführung gelassen, wie dies z. B. bei der Einzelfertigung nötig ist. Die Kommissionierung ist ein einfacher Vorgang mit einem relativ konstanten Prozessablauf. Es ändern sich die Aufträge und damit auch die Wege und die Greifvorgänge. Trotzdem arbeiteten die Probanden individuell unterschiedlich, beispielsweise bei der Handhabung der Papierliste, so dass ein theoretisch optimaler Bewegungsablauf zugrunde gelegt wurde, wobei Beobachtungen und Videos des Labortests als Grundlage für die Analyse dienten. Da es für die manuelle Kom-

missionierung keine speziellen Bausteine gibt, wird diese sehr detailliert untersucht und dafür das MTM-1-Verfahren verwendet. Der Kommissioniervorgang kann mit den Grundbewegungen und den Körperbewegungen aus MTM-1, denen Zeiteinflussgrößen in Abhängigkeit von MTM-Normzeitwerten zugeordnet sind, abgebildet werden. Die Zeitwerte basieren auf dem LMS-Verfahrens (Lowry, Maynard, Stegemerten) und definieren eine Normleistung, die der Leistung eines mittelgut geübten Menschen entspricht, der diese Leistung ohne zunehmende Arbeitsermüdung auf Dauer erbringen kann. Wichtig bei dieser Untersuchung ist, dass die Zeiten für die Informationsaufnahme berücksichtigt werden. MTM-1 ist nicht für geistige Tätigkeiten anwendbar, die über einfache Ja-Nein-Entscheidungen hinausgehen. Aber es gibt Blickfunktionen, die das Verschieben des Blickes wiedergeben, und einen Baustein für Lesen, der bei der Papierliste genutzt worden ist.

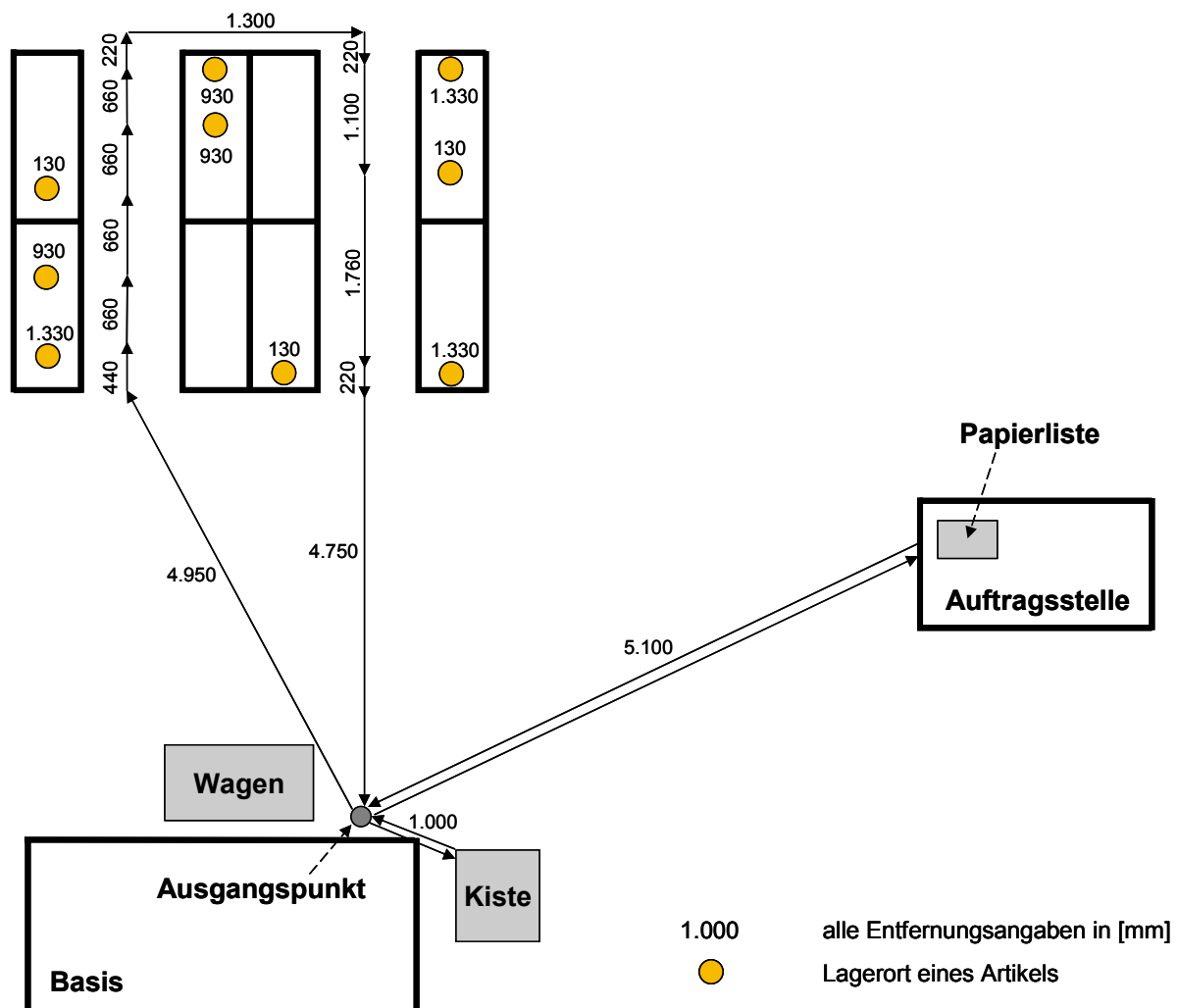


Abbildung 8-1: Zugrundeliegendes Layout für die MTM-Analyse für den dritten Auftrag bei der Papierliste

Es werden die ersten drei Aufträge für alle drei Kommissioniertechniken inklusive Login mit MTM-1 betrachtet. Die GUI, die Interaktion und der Lageraufbau werden entsprechend dem Stand des Labortests verwendet und der Kommissionierwagen wird immer mit in die Gasse genommen (siehe Abbildung 8-1).

Bei der Papierliste wird für das Lesen die „Regel L-2“ (Lesen von Einzelwörtern, Buchstaben, Ziffern oder Zeichen) benutzt (Baustein Prüfen). Die Liste und der Stift werden während der Arbeit in der Hand gehalten. Es wird jede Position abgehakt und das Ende des Auftrags wird mit Unterschrift und Datum quittiert. Es wird nicht die volle Schrittlänge von 0,85 m sondern nur 0,75 m verwendet, weil sich die Kommissionierer zwischen den Regalen und mit Kommissionierwagen bewegen.

Da es keine MTM-Bausteine für Informationsaufnahme über ein HMD gibt, werden entsprechende Bausteine selbst generiert, die Ähnlichkeit zu den Bausteinen zur Informationsaufnahme durch normales Lesen (Regel L-2) haben, wenn über das HMD nur Text angezeigt wird. Die Projektionsebene des Nomad ist so eingestellt, dass es einem 17 Zoll Monitor in einer Armlänge Entfernung entspricht. Es ist kein Blickwechsel zum Lesen notwendig, weil die Daten stets vor dem Auge sind. Dies kann für das Ablesen der statischen Textinformationen ohne weiteres übertragen werden. Für das Folgen des Tunnels lässt sich diese Art der Informationsaufnahme nicht einsetzen, weil dies geistige, mit MTM nicht abbildbare Vorgänge sind. Für diesen Vorgang gibt es keine Methode, die sich mit MTM beschreiben lässt, so dass das Pick-by-Vision-System mit Tracking in dieser Analyse nicht weiter betrachtet wird. Die Systemeingaben über den Dreh-/Drückknopf lassen sich mit MTM-Bausteinen abbilden, denn der Benutzer langt zum Gerät hin und greift. Zudem sind Bausteine für das Drehen aus dem Handgelenk und das Drücken vorhanden. Ein Ablesen der Daten ist während der Bewegung möglich, so dass die Vorgänge parallelisiert werden können. Die Schrittlänge wird auf 0,6 m reduziert, weil sich der Proband ggf. vorsichtiger bewegt. Bei Pick-by-Vision beginnt der Ablauf mit dem einmaligen Login. Beim Login liest der Benutzer den kompletten Text der Anmeldemaske ab. Auch bei den weiteren Masken zur Auftragsauswahl, zur Sammelbehälteraufnahme und beim Ablesen der Positionsinformationen wird jeweils der gesamte Text berücksichtigt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-1 dargestellt. Die MTM-Analyse für die Papierliste weist eine um 18 s schnellere Durchschnittszeit für die drei Aufträge als bei der realen Versuchsreihe auf. Mit MTM wurde eine ideale Handhabung der Papierliste ein-

geplant, die in der Realität so nicht gegeben war, denn viele der Probanden wussten nicht, wie sie die Liste am geschicktesten handhaben können. So lässt sich die bessere MTM-Zeit erklären. Bei der MTM-Analyse wurde die Papierliste zum Quittieren jedes Mal ins Regal gelegt. Bei der Betrachtung der Einzelaufträge fällt auf, dass der erste Auftrag mit MTM um 16 s langsamer, während die anderen beiden Aufträge 13 bzw. 21 s schneller sind. Beim dritten Auftrag ist die zweiseitige Papierliste nach der sechsten Position einmal umzublättern. Nach der Unterschrift bei der Abgabe muss wieder zurückgeblättert werden, bevor die Liste in den Sammelbehälter abgelegt wird. Für Pick-by-Vision ohne Tracking ist ein ähnlicher Effekt zu beachten. Die MTM-Zeit ist um 16 s schneller, was daran liegt, dass MTM ein Zurechtrücken einer verrutschten Kappe oder unnötigen Bewegungen des Dreh-/Drückknopfs, weil z. B. der für den aktuellen Prozessschritt benötigte Button wegen eines unabsichtlichen Verstellens des Knopfes nicht im Fokus lag, berücksichtigt. Werden die drei Aufträge einzeln betrachtet, ist zu erkennen, dass die Werte um +/- 20 s abweichen. Während der erste Auftrag mit MTM etwas langsamer ist, sind die anderen beiden schneller. Beim ersten Auftrag kann dies damit erklärt werden, dass die Probanden beim Labortest beim Login nicht alles lasen bzw. beim Beginn der Zeitnahme schon den Namen ausgewählt hatten. Allerdings berücksichtigt die MTM-Analyse keine ergonomischen und psychologischen Gesichtspunkten. Es ist auch noch nicht klar, wie sich die Informationsaufnahme im Realen von der durch das HMD unterscheidet und deswegen der MTM-Baustein „Lesen“ ohne weiteres auf Datenbrillen übertragen werden kann..

	Papierliste		Pick-by-Vision ohne Tracking		Pick-by-Vision mit Tracking
	MTM	real	MTM	real	real
Auftragszeit Auftrag 1 [min]	1:51	1:35	1:46	1:40	1:30
Auftragszeit Auftrag 2 [min]	2:28	2:41	2:06	2:22	2:18
Auftragszeit Auftrag 3 [min]	3:16	3:37	3:02	3:08	3:26
Gesamtzeit [min]	7:35	7:53	6:54	7:10	7:13
Zeit pro Position [s]	0:25,3	0:26,3	0:23,0	0:24,3	0:24,4
Kommissionierleistung [Pos/h]	142,6	137,0	156,4	148,2	147,9
Zeit für Login [min]	--	-	0:22,0	-	-
Zeit pro Position ohne Login [min]	-	-	0:21,8	-	-

Tabelle 8-1: Vergleich der drei Technologien mit MTM-1

8.2 Wirtschaftliche Analyse

Ein unklares Kosten-/Nutzenverhältnis ist eines der wichtigsten Hindernisse bei der Umsetzung strategischer Projekte [Str-05]. Praktiker lehnen Entwicklungstrends ab, wenn es sich um teure Kuriositäten handelt. Aber auch von derartigen Trends können positive Impulse ausgehen [MaH-94]. Eine definitive Kosten-/Nutzen-Betrachtung ist für Pick-by-Vision derzeit nicht möglich. Dies liegt zum einen daran, dass ein Vergleich von verschiedenen Kommissioniersystemen mit ihren spezifischen Anforderungen kaum möglich ist. Die Kostentreiber innerhalb Kommissioniersystemen sind die Aufträge, die Auftragspositionen sowie die einzelnen Entnahmeeinheiten [Cro-07] und dies hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Die Effizienzsteigerung beim Einsatz neuer Informationsbereitstellungstechnologien beruht meistens darauf, dass ein alter Kommissionierprozess komplett überdacht wurde und die Effizienzsteigerung vor allem auf die Prozessveränderungen und nur zu einem Bruchteil auf die neue Informationsbereitstellungstechnologie zurückzuführen ist. Wirtschaftlichkeitskenngrößen innerhalb von Arbeitssystemen zeigen oft keine ursächlichen Zusammenhänge, z. B. zwischen Stückerlös und Wirksamkeit einzelner Arbeitssysteme. Die Kosten können oft nicht einer der Bestimmungsgrößen eines Arbeitssystems zugeordnet werden [Bok-06]. Zum zweiten ist eine detaillierte Kosten-/Nutzen-Betrachtung für die Komponenten eines AR-Systems schwierig.

Pick-by-Vision bietet mit und ohne Trackingsystem seine Potenziale. Im Labortest ist gegenüber einer Papierliste eine Zeitersparung zu erkennen. Die Durchlaufzeit wird nur geringfügig gesteigert, aber die Anlernzeiten für neue Mitarbeiter sind aufgrund der Prozessführung sehr kurz. In Kommissioniersystemen können geübte Mitarbeiter ohne weiteres dreimal schneller sein als ungeübte (siehe Beispiel in [Vog-97]). Kurze Anlernzeiten sind nicht nur für den Lernenden vorteilhaft, sondern sparen auch Zeit des Lehrenden. Bei einem Kommissioniersystem mit vielen Leiharbeitern ist dies kein unerhebliches Potenzial. Hat der Lernende dazu noch Erfahrungen im 3D-Bereich, kommt er noch schneller mit Pick-by-Vision zurecht. In der Versuchsreihe wurden mit beiden Pick-by-Vision-Systemen ca. 300 EE/h (mit der Papierliste 270 EE/h) von ungeübten Probanden kommissioniert. In anderen Versuchsreihen mit einem ähnlichen Setup wurden mit Pick-by-Vision ohne Tracking ebenfalls ca. 300 EE/h kommissioniert [Gün-09]. Praxiswerte für die Papierliste sind 70 bis 100 Picks/h und für papierlose MzW-Systeme 300 bis 600 Picks/h [Jün-00]. Der Ver-

suchsaufbau ist nur schwer mit einem realen konventionellen Kommissioniersystem zu vergleichen, weil der Kommissionierbereich je Mitarbeiter viel größer und somit auch der Wegzeitanteil höher ist. Pick-by-Vision führt bei einer optimalen Konfiguration auch zur Vermeidung von Fehlern. In Anbetracht, dass 1 % mehr Fehler 10 % höhere Kosten in der Auftragsabwicklung verursachen [Fis-94], ist dies ein erhebliches Potenzial. Eine gute technische Unterstützung von Kommissionierprozessen führt zu deutlichen Qualitätssteigerungen. In der Intralogistik entsteht nicht nur ein Großteil der Kosten, auch die Qualität wird hier produziert [Mie-06].

Den Einsparungen sind die Kosten für die Hardware und die Implementierung gegenüberzustellen. Die Komponenten eines AR-Systems sind oft Spezialanfertigungen und für die am Markt erhältlichen existiert kein Massenmarkt. Die Kosten v. a. für Datenbrillen und Trackingsysteme, aber auch für die Software sind hoch, obwohl die Praxistauglichkeit eingeschränkt ist. Auf dem Datenbrillenmarkt ist eine Henne-Ei-Problematik zu erkennen. Die Entwickler beklagen die fehlende „Killer Application“ für den Einsatz von Datenbrillen, auf der anderen Seite sagen potenzielle Anwender, dass die HMDs noch nicht so weit sind, kommerziell eingesetzt zu werden [Rüg-02]. Bei der Evaluation im Labortest in dieser Arbeit zeigte sich kein Unterschied bei Pick-by-Vision hinsichtlich des Einsatzes eines Trackingsystems⁵⁵. Sollte sich dies auch bei länger andauernden Tests bestätigen, kann auf den Einsatz eines Trackingsystems verzichtet werden. Die Kosten und die Komplexität sinken. Die Kosten für die Hardwarekomponenten des in der Evaluierung eingesetzten Systems ohne Tracking bewegen sich im Vergleich zu der Kostenspanne anderer papierloser Informationsbereitstellungstechniken (siehe Kapitel 2.6.2) eher in deren oberen Bereich. Die Kosten für die Installation des Systems in einem konkreten Kommissioniersystem dürften sich in einer ähnlichen Dimension wie bei herkömmlichen papierlosen Systemen bewegen.

Eine Ableitung des Installationsaufwandes aus den Implementierungskosten für den Prototyp am Lehrstuhl fml auf reale Anwendungen ist nur schwierig möglich. Es sind noch weitere Kosten für die Einführung und auch für den Betrieb eines AR-Systems

⁵⁵ Es zeigte sich aber auch, dass durch die direkte Hervorhebung des Lagerfachs durch Einsatz eines Trackingsystems die Fehlerquote auch nach längerem Arbeiten geringer ist als beim Ablesen von Textinformationen.

8 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

zu berücksichtigen. Bei der Einführung eines AR-Systems sind zunächst einige Dinge zu beachten:

- Anforderungen bezüglich der Aufgabe: Was kann AR am realen (bisherigen) Prozess verbessern [Fri-04]?
- Eine zeitliche Gegenüberstellung des realen Prozesses mit dem AR-Prozess (bei AR fallen meist zusätzliche Tätigkeiten wie die Kalibrierung an) [Fri-04].
- Gesamtwirtschaftlichkeit eines Kommissioniersystems hängt + 20 % von der Führungsqualität [Fis-94] und somit von deren Verhalten bei der Einführung.
- Neben den Kosten für die Einführung fallen auch laufende Kosten für den Einsatz von AR an (siehe Abbildung 8-2).

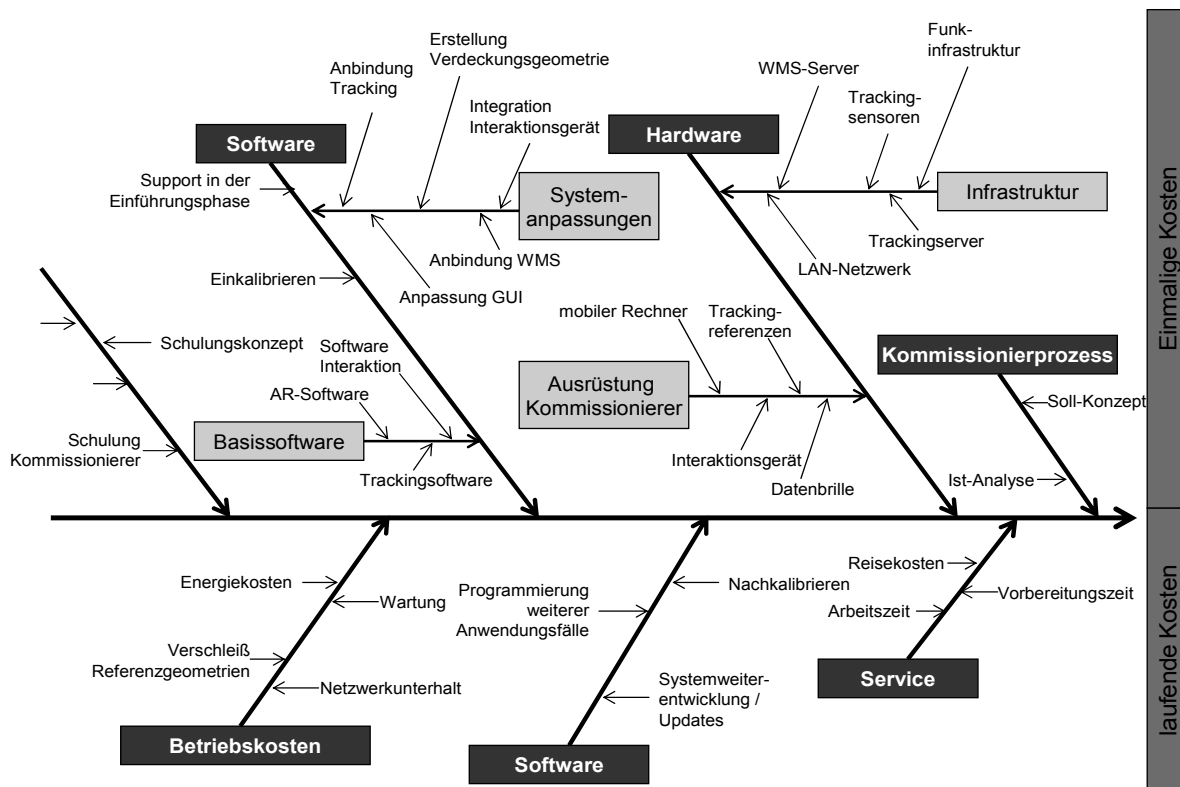


Abbildung 8-2: Einmalige und laufende Kosten für die Einführung eines AR-Systems in der Kommissionierung (nach [Fri-04])

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einsatz der AR-Technologie in der manuellen Kommissionierung untersucht. Nach der Betrachtung des manuellen Kommissionierprozesses und der herkömmlichen Informationsbereitstellungstechnologien sowie wichtigen Aspekten von mobilen AR-Systemen unter dem Einsatz einer Datenbrille, erfolgte eine Untersuchung der Potenziale des AR-Einsatzes speziell für die Kommissionierung. Die Kommissionierung ist eine Aufgabe mit einer relativ konstanten Komplexität. Die AR-Unterstützung ist deshalb an die Erfahrung des Mitarbeiters anzupassen, d. h. nach einer Einlernzeit kann er individuell den Unterstützungsgrad innerhalb der unternehmensspezifischen Randbedingungen festlegen. Der Einsatz von Datenbrillen ist bei der Bedienung von Flurförderzeugen kritisch, so dass Pick-by-Vision vor allem in folgenden vier Einsatzszenarien Sinn macht: der konventionellen Kommissionierung, der Kommissionierung entlang einer Regalzeile, in Kommissioniernestern und an stationären Kommissionierarbeitsplätzen. Die Mitarbeiter können dabei mit statischen Text-, aber auch mit dynamischen 3D-Informationen, wie der optischen Hervorhebung des Entnahme- und des Ablageorts, unterstützt werden. Am besten eignen sich ein VRD, optisches Tracking und ein Dreh-/Drückknopf bzw. Sprachsteuerung für die Konzeption eines Pick-by-Vision-Systems. Mit den Anforderungen aus dieser Hardwareauswahl und dem ausgewählten Kommissionierprozessen ließ sich ein Systementwurf inklusive eines Interaktionskonzepts entwickeln. Dieses Konzept wurde in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml an einem einfachen Kommissionierprozess evaluiert. Es zeigte sich, dass Pick-by-Vision mit wie auch ohne Trackingsystem eine sehr steile Lernkurve hat und die logistischen Kennzahlen (Kommissionierzeit und -fehler) für die ungeübten Probanden im Vergleich zu einer einfachen Papierliste besser sind. Die subjektive Beanspruchung war mit der Datenbrille bei mehreren Tests nicht höher als wie mit der Papierliste. Die mentale Beanspruchung war beim System mit Tracking gering, weil der Lagerplatz direkt hervorgehoben wird und der Benutzer nicht mehr umdenken muss. Auch die Verdeckung des FoVD durch

den Tunnel war nicht unangenehmer als beim System ohne Tracking. Eine MTM-Analyse bestätigte die zeitlichen Vorteile durch Parallelisierung von Abläufen.

9.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Der Labortest in dieser Arbeit war nur eine Kurzzeituntersuchung. Damit können keine Aussagen zur Ergonomie hinsichtlich einer Langzeitwirkung getroffen werden. Es sind nicht nur psychologische Langzeitstudien, sondern auch weitere Entwicklungsarbeit bei den beiden wichtigen Hardwarekomponenten HMD und Tracking, aber auch bei der Interaktion und der Prozessintegration nötig. Ob Futurist R. Kurzweil recht behält, wenn er meint, dass 2010 Computer in Brillen und Gürtelschnallen verschwinden, in 15 Jahren die Rechenleistung die der heutigen Produkte milliardenfach übersteigen wird und kein Unterschied mehr zwischen virtueller und realer Realität erkennbar ist [Bon-08], bleibt abzuwarten. Tatsache ist, dass der Einsatz von PDAs oder Handys mit integrierten Kameras immer weiter verbreitet ist und die Leistung von Prozessoren und Grafikkarten rasant steigt, so dass sich die Latenzzeit weiter reduziert. Datenbrillen werden immer häufiger als mobile Displays für das Abspielen von Videos angeboten. Diese binokularen VST-Brillen sind zwar für den industriellen Einsatz nicht geeignet, aber mit Kosten bis 400 € für den Endverbraucher erschwinglich [KIM-09]. Dies steigert die soziale Akzeptanz von HMDs und sollte sich diese Entwicklung durchsetzen, entsteht ein Massenmarkt und die Entwicklung neuer HMDs wird rentabler. Dies fördert auch die Entwicklung industrietauglicher HMD. Eine Akzeptanzsteigerung bei Datenbrillen ist durch weitere Miniaturisierung erreichbar [Rüg-02]. Entwicklungen wie ein neues OLED-Display des Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), das auf Augenblinzeln reagiert [ScT-08], einen ersten farbigen Prototypen eines VRD der Fa. Brother ([Kuh-08], [ScW-08]), das komplett transparente Aktivmatrix-Display auf Grundlage von OLEDs der TU Braunschweig ([Esw-07], [Gör-06]) oder das Kontaktlinsendisplay der University of Washington [Hic-08] zeigen neue Wege in der Visualisierungstechnik auf. Bei den Trackingsystemen ist eine Weiterentwicklung hinsichtlich des mobilen Einsatz und der Echtzeitfähigkeit abzusehen. Beim Tracking geht neben der Verbesserung vorhandener Verfahren der Trend zu hybriden Systemen. Ein Massenmarkt für Trackingsysteme beginnt sich zu entwickeln und hier sei besonders auf den Einsatz von IR-Tracking bei der Spielekonsole Nintendo Wii verwiesen [Wii-08]. „Computerspiele

haben für die Entwicklung der Computertechnologie inzwischen die gleiche Bedeutung wie die Formel 1 für die Automobilindustrie“ (HP Vice-President Todd Bradley) [Wei-08]. Wichtig ist, dass sich das Tracking in die öffentliche (vorhandene) Infrastruktur, z. B. RFID zur Warenverfolgung etc., integrieren lässt, um Kosten zu senken (v. a. wide-area Tracking) [Bec-08]. Zukunftsweisende Verfahren wie das voraussagende Tracking (Predictive-Tracking) helfen, die Latenzzeit zu minimieren. Algorithmen berechnen dabei die wahrscheinliche Bewegung des Trackinggegenstandes im Voraus [Azu-95]. Das Tracking der Augenbewegung kann dazu verwendet werden, die Bewegungen des Benutzers vorauszudenken. Wird ein VRD als HMD eingesetzt, gibt es den Ansatz, die Strahlung, die bei VRD nach außen auftritt (Strahlenteiler reflektiert ca. 40 % in Umgebung) durch Sensoren zu erfassen und somit die Position der Datenbrille zu berechnen (v. a. für Jetpiloten) [Chi-03].

Auch die Interaktionsgeräte und -metaphern müssen sich hinsichtlich der Anforderungen von AR weiterentwickeln. Blickverfolgung und Interaktion mit den Fingern sind mögliche Ansätze [Gra-08]. Gedankenlesen, sog. Brain Computer Interfaces (BCI) als Kommunikationshilfen für Schwerstgelähmte dürften in wenigen Jahren kommerziell verfügbar sein [Mar-06]. Eine industrielle Einsetzbarkeit liegt noch in weiter Zukunft, aber nicht-invasive Methoden, d. h. ohne chirurgischen Eingriff, wären für AR-Systeme geeignet. Eine erste nicht-invasive Umsetzung gibt es bereits für ca. 300 \$ als Eingabegerät für Spiele [Bon-08]. Manche Probanden konnten das Spiel problemlos bedienen, bei manchen waren die Aktionen eher zufällig. Für schnelle und exakte Steuerbewegungen ist dieses Gerät noch nicht geeignet [Wei-08]. Im militärischen Bereich werden viele Forschungsarbeiten in diesem Bereich wie beispielsweise das „Denken der Feuerkommandos“ durchgeführt [Wei-08]. Jeder Mensch ist bzw. denkt anders, so dass eine Trainingsphase erforderlich ist und nur feste Kommandos und nicht die Gedanken erkannt werden.

Für die Kommissionierung ist eine gute Spracheingabe bzw. ein durchdachtes Interaktionskonzept mit einem Dreh-/Drückknopf ausreichend. Wenn geeignete Datenbrillen und Trackingverfahren verfügbar sind, ist die Kommissionierung ein vielversprechender industrieller Anwendungsfall für AR. Die sehr hohe Wachstumsperspektive von Value Added Services bei LDL (48 %) [Str-05] birgt das Potenzial mit AR weitere Tätigkeiten im Lagerbereich zu unterstützen. Nahezu alle Untersuchungen zur AR-Kommissionierung werden in Deutschland durchgeführt, das hier eine Vorreiterrolle

bei einer innovativen und in wenigen Jahren einsatzfähigen Technologie einnimmt. Für die Zukunft wird in der Entwicklung neuer Technologien ein wachsendes Einflusspotenzial gesehen [Str-05]. Nur durch intelligenten Einsatz innovativer Logistiktechnologien und Personalkonzepte kann bei Differenzierung der Logistikleistung ein Kostensprung verhindert werden [Str-05]. Nachhaltiges Wachstum ist nur durch Innovation zu erreichen [MiJ-08].

10 Literaturverzeichnis

- [Ali-06] Alicke, K.; Lippolt, C.; Wisser, J.:
Prozessorientiertes Benchmarking von Distributionszentren in Wertschöpfungsnetzwerken.
In: Arnold, D. (Hrsg.):
Intralogistik.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006, S. 91-100.
- [Alt-03] Alt, T.:
Augmented Reality in der Produktion.
Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
München: Herbert Utz Verlag, 2003.
- [Arn-05] Arnold, D.:
Materialfluss in Logistiksystemen.
Berlin: Springer Verlag, 4. Auflage, 2005.
- [ART-08] Advanced Realtime Tracking GmbH:
<http://ar-tracking.eu/Home.10.0.html>
letzter Abruf: 01.03.2009.
- [ATK-08] ARToolKit:
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
letzter Abruf: 09.03.2009.
- [Azu-01a] Azuma, R., T.:
Augmented Reality: Approaches and Technical Challenges.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001, S. 27-63.
- [Azu-01b] Azuma, R. T.; Baillot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B.:
Recent Advances in Augmented Reality.
In: IEEE Computer Graphics and Applications, 21(6), 11-12/2001, S. 34-47.
- [Azu-95] Azuma, R. T.:
Predictive Tracking for Augmented Reality.
Dissertation, UNC Chapel Hill, 1995.
- [Azu-97] Azuma, R. T.:
A survey of Augmented Reality.
Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 8/1997, S. 355-385.

- [Bad-08] Bade, C.; Hoffmeyer, A.; Doil, F.:
Industrielle Anwendung von Augmented Reality in der Fertigungsplanung bei der Volkswagen AG.
In: Schenk, M. (Hrsg.):
„Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betrieben technischer Systeme“.
Magdeburg: Fraunhofer IFF, 2008, S. 41-51.
- [BaF-07] Badenschier, F.:
Hightech-Kampfanzug aus der Geisterstadt.
spiegel online, 25.04.2007.
- [BaG-04] Baratoff, G.; Regenbrecht, H.:
Developing and Applying AR Technology in Design, Production, Service and Training.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 208-236.
- [Ban-08] Banner Engineering:
Montagefehlern vorbeugen.
Automobil-Produktion, 2/2008, S. 65.
- [Bar-08] Barck, R.:
RFID und Echtzeit-Ortung trotz Metall.
Logistik für Unternehmen, 9/2008, S. 38-39.
- [Bau-08] Baumgarten, H.:
Globalisierung ohne Ende?
Logistik inside, 1/2008, S: 52-54.
- [BaM-07] Bauer, M.:
Tracking Errors in Augmented Reality.
Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [Bec-08] Becker, B.; Huber, M.; Klinker, G.:
Utilizing RFIDs for Location Aware Computing.
In: Sanders, F. E. et al. (Hrsg.):
UIC 2008.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008, S. 216-228.
- [Beh-05] Behzadan, A. H.; Kamat, V. R.:
Visualization of Construction Graphics in Outdoor Augmented Reality.
In: Kuhl, M. E.; Steiger, N. M.; Armstrong, F. B., Joines, J. A. (Hrsg.):
Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 04.-07. Dezember 2005, S. 1914-1920.

- [BeM-06] Bernatchez, M.:
Resolution analysis for HMD helmets.
http://vresources.org/article/vre_articles/analyhmd/analysis.htm
Download: 14.05.2006.
- [Ber-07] Berndt, D.; Mecke, R.; Teutsch, C.; Tümler, J.:
Montageassistent mit Augmented Reality – mobile Mess- und Prüftechnik schafft Durchblick.
IFF Focus – Mensch-Maschine interaktiv, 2/2007, S. 44-46.
- [BeT-93] Becker, T.:
Automatische Kommissionierung.
München: LogBuch Verlag, 1993.
- [Beu-04] Beu, A. (Hrsg.):
Style Guide für Augmented Reality Systeme.
<http://www.uid.com/arvika/>
Download: 20.11.2008.
- [Bil-01] Billinghurst, M., Kato, H. and Poupyrev, I.:
The MagicBook - Moving Seamlessly between Reality and Virtuality.
In: Computer Graphics and Applications, 5-6/2001, S. 2-4.
- [Bio-06] Biocca, F.; Tang, A.; Owen, C.; Xiao, F.:
Attention funnel: omnidirectional 3D cursor for mobile augmented reality platforms.
In: CHI '06: Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems.
New York, NY, USA: ACM Press, 2006, S. 1115-112.
- [Bri-94] Brickenkamp, R.:
Test d2 Aufmerksamkeits-Belastungs-Test.
Göttingen: Hogrefe, 8. Auflage, 1994.
- [BMW-05] BMW AG:
Kamera führt Bolzen ins Ziel.
Automobil-Produktion, 10/2005, S. 90.
- [Bok-06] Bokranz, R.; Landau, K.:
Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen.
Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2006.
- [Bon-08] Bonnert, E.; Gieselmann, H.:
Der futurologische Kongress.
c't, 6/2008, S. 48-49.

- [Bop-08] Boppert, J.:
Entwicklung eines wissensorientierten Konzepts zur adaptiven Logistikplanung.
Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [Bor-05] Bortz, J.:
Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.
Berlin: Springer Verlag, 6. Auflage, 2005.
- [Bow-05] Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola jr., J.; Poupyrev, I.:
3D User Interfaces.
Boston: Addison-Wesley, 2005.
- [Bra-05] Brau, H.; Ullmann, C.; Duthweiler, M.; Schulze, H.:
Gestaltung von Augmented Reality Applikationen für Kommissionieraufgaben.
In: Urbas, L.; Steffens, C. (Hrsg.):
Zustandserkennung und Systemgestaltung Bd. 19.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- [Bre-04] Brecher, C.; Hoymann, H.; Lescher, M.:
Effizienz und Flexibilität beim mobilen Einsatz von AR im Service.
wt Werkstattstechnik online, 5/2004, S. 242-246.
- [BrL-07] Breu, L.:
Kein isolierter Prozess.
Materialfluss, 5/2007, S. 10-13.
- [Bro-96] Brooks, F. P. Jr.:
The Computer Scientist as Toolsmith II.
Communications of the ACM, 3/1996, S. 61-68.
- [BrW-04] Broll, W.:
Augmented Reality für Architektur und Städtebau.
wt Werkstattstechnik online, 3/2004, S. 70.
- [Bry-95] Brynzér, H.; Johansson, M. I.:
Design and performances of kitting and order picking systems.
In: International Journal of production economics, Volume 41, 1995, S. 115-125.
- [Bub-01] Bubb, H.:
Beurteilung des Einflusses menschlicher Zuverlässigkeit im Produktionsprozess.
In: Landau, K.; Luczak, H. (Hrsg.):
Ergonomie und Organisation in der Montage.
München: Hanser, 2001, S. 236-269.

- [Bub-93] Bub, H.; Schmidtke, H.:
Systemergonomie.
In: Schmidtke, H. (Hrsg):
Ergonomie.
München Wien: Hanser Verlag, 3. Auflage, 1993, S. 305 - 458.
- [Buc-05] Buchmann, R.:
Skalierbare, modulare Kommissioniertechnik.
Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI-Berichte 1882.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1994, S. 37-46.
- [Bur-94] Burdea, G., Coiffet, P.:
Virtual Reality Technology.
New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [Cak-06] Cakmakci, O.; Rolland, J.:
Head-Worn Displays: A Review.
In: Journal of Display Technology, Col. 2, No. 3, 9/2006, S. 199-216.
- [Cau-92] Caudell, T.; Mizell, D.:
Augmented Reality: An application of Heads-Up Display Technology to
Manual Manufacturing Processes.
In: Proceedings IEEE Hawaii International Conference on Systems Sci-
ences, 1/1992, S. 659-669.
- [Chi-03] Chinthammit, W.; Seibel, E. J.; Furness, T. A.:
A shared-aperture tracking display for augmented reality.
Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1/2003, S. 1-18.
- [Ciu-04] Ciupek, M., Schilling, J.:
Sprache steuert den Warenfluss.
VDI Nachrichten, 08.10.2004, S. 15.
- [Con-03] Conrad, M.:
Kommissioniersysteme und IT: Gemeinsam zum Erfolg.
F+H Fördern und Heben, 6/2003, S. 328-330.
- [Cro-07] Crostack, H.-A.; Deuse, J.:
Optimierung von Kommissionierung und Verpackung durch geeignete
Strategien für die Qualitätssicherung unter Berücksichtigung der Retoure-
nabwicklung.
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Dortmund, 2007.
- [Dan-05] Dangelmeier, W.; Mueck, B.; Franke, W.:
Mixed Reality in Lagerprozessen.
In: Gausemeier, J.; Grafe M.:
Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, 2005, S. 133-143.

- [DeS-07] de Schmidt, A.:
LED mit Lineal.
Logistik heute, 11/2007, S. 52-53.
- [DIN10075] DIN ISO 10075-1:
Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil
1: Allgemeines und Begriffe.
Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [DIN13407] DIN EN ISO 13407:
Benutzerorientierte Gestaltung interaktiver Systeme.
Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [DIN55350] DIN 55350:
Begriffe zum Qualitätsmanagement – Teil 11:
Berlin: Beuth Verlag, 1987.
- [DIN6385] DIN EN ISO 6385:
Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.
Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [DIN9241] DIN EN ISO 9241:
Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.
Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [DLA-06] Deutsche Logistik Akademie:
Seminarunterlagen: Analyse und Bewertung von Kommissioniersystemen.
München, 9.-10. Mai 2006.
- [Dul-05] Dullinger, K.-H.:
Das richtige Kommissionier-Konzept - eine klare Notwendigkeit.
In: Jahrbuch Logistik 2005.
Düsseldorf: Verlagsgruppe Handelsblatt, 2005, S. 194-198.
- [Ech-04] Echtler, F.; Sturm, F.; Kindermann, K.; Klinker, G.; Stilla, J.; Trilk, J., Naja-
fi, H.:
The intelligent welding gun: Augmented Reality for experimental vehicle
construction.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 333-360.
- [Ede-05] Edelmann, M.; Rottenkolber, B.; Brattke, S.:
Head Mounted Display: Von der Grundlagenforschung bis zum Ge-
schäftsansatz.
In: Gausemeier, J.; Grafe M.:
Augmented and Virtual Reality in der Produktentstehung.
Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 167, 2005, S. 13-20.

- [Erw-02] Erwin Steinle Internationale Spedition:
Scannergeführte Kommissionierung: Vor Fehlern gefeit.
F+H Fördern und Heben, 8/2002, S. 514.
- [EU90270] EU-Richtlinie über die Mindestvorschriften bezüglich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes bei der Arbeit an Bildschirmgeräten, 1990.
- [Eve-01] Eversheim, W.; Weck, M.; Jahn, D.; Koschig, M.; Fricker, I.:
Augmented Reality-Technologie unterstützt manuelle Montage.
VDI-Z, 9/2001, S. 90-93.
- [Eye-08] The Eye of Judgement:
<http://www.eyeofjudgment.com/>
letzter Abruf: 01.03.2009.
- [Fas-08] Fasel, J.:
Ein Brummi aus acht Bildschirmen.
Faszination Forschung. Das Wissenschaftsmagazin der TU München,
2/2008, S. 32-38.
- [Fei-93] Feiner, S.; MacIntyre, B.; Seligmann, D.:
Knowledge-Based Augmented Reality.
In: Communications of the ACM, 7/1993, S. 52-62.
- [Fer-91] Ferrin, F. J.:
Survey of Helmet Tracking Technologies.
In: Proceedings of Large-Screen Projection, Avionic, and Helmet-Mounted
Displays. New York: SPIE Vol. 1456, 1991, S. 86-94.
- [Fis-94] Fischer, J.-H.:
Zero-defect-picking – Neue Strategien in der Kommissionierung.
In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
Kommissionieren in Industrie und Handel.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1994, S. 11-22.
- [Fje-99] Fjeld, M.; Bichsel, M.; Hrdliczka, V.; Lauche, K.; Voorhorst, F.:
BUILD-IT-Feasible.
In: Ulich, E. (Hrsg.):
Optimierung der Produkt- und Prozessentwicklung.
Zürich: vdf Hochschulverlag, 1999, S. 33-49.
- [Föl-05a] Föllner, J.:
Techniken zur Informationsbereitstellung in der Kommissionierung.
F+H Fördern und Heben, 2/2005, S. 38-41.
- [Föl-05b] Föllner, J.:
Vergleichsstudie „Pick-by-Voice“-Systeme, Teil II.
F+H Fördern und Heben, 9/2005, S. 468-472.

- [Fra-04] Franke, W., Mueck, B.:
Gibt es noch Innovationspotenzial in der Lagerlogistik?
In: Dangelmaier, W.; Kaschula, D.; Neumann, J. (Hrsg.):
Supply Chain Management in der Automobil- und Zulieferindustrie.
Paderborn: Fraunhofer-ALB, 2004, S. 417-427.
- [Fri-04] Friedrich, W. (Hrsg.):
ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service.
Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2004.
- [FrL-06] Fritzsche, L.:
Eignung von Augmented Reality für den Vollschiefeinsatz in der Automobilproduktion.
Diplomarbeit, TU Dresden, 2006.
- [Frü-04] Fründ, J.; Gausemeier, J.; Grafe, M.; Matysczok, C.:
Augmented Reality as a New User Interface for the Layout Planning of Manufacturing Systems.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 169-182.
- [Fuc-08] Fuchslocher, G.:
Schneller bessere Abläufe.
Automobil-Produktion, 10/2008, S. 32-33.
- [Gar-08] Gartner, Inc.:
Gartner identifies Top Ten disruptive Technologies for 2008 to 2012.
Pressemitteilung von Gartner, Inc., 28.05.2008.
http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=681107#_ftn1
- [Gil-08] Gillies, C.:
Zeitenwende.
Logistik inside, 9/2008, S. 36-37.
- [Gör-06] Görrn, P.; Sander, M.; Meyer, J.; Kröger, M.; Becker, E.; Johannes, H.-H.; Kowalsky, W.; Riedl, T.:
Towards See-Through Displays: Fully Transparent Thin-Film Transistors Driving Transparent Organic Light-Emitting Diodes
In: Advanced Materials, Volume 18, Issue 6, 2006, S. 738-741.
- [Gra-08] Grasset, R.; Dünser, A.; Billinghamurst, M.:
The Design of a Mixed Reality Book: Is It Still a Real Book?
In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008.
15.-18. September, Cambridge, UK, S. 99-102.
- [Gud-05] Gudehus, T.:
Logistik.
Berlin: Springer Verlag, 3. Auflage, 2005.

- [Gün-04] Günthner W. A.; Schedlbauer, M.; Wulz, J.:
Augmented Reality in der innerbetrieblichen Logistik.
wt Werkstattstechnik online, 7-8/2004, S. 363-365.
- [Gün-06a] Günthner, W. A.; Wulz, J.; Reske, M.:
Virtuelle Kollision spart Werkumbau.
Automobil-Produktion, 1/2006, S. 66-67.
- [Gün-06b] Günthner, W.A.; Kessler, S.; Sanladerer, S.:
AR-Einsatz im Tagebaubetrieb zur optimierten Baggersteuerung.
Seminarband KIB- Kolloquium für Innovationen im Braunkohletagebau,
08.-09. November 2006, Magdeburg.
- [Gün-07] Günthner, W. A.; Heptner, K.:
Technische Innovationen in der Logistik.
München: Huss-Verlag, 2007.
- [Gün-09] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R.; Schedlbauer, M.:
Pick-by-Vision: Augmented Reality unterstützte Kommissionierung.
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Garching, 2009.
- [GüP-06] Günther, P.:
Intralogistik – eine starke Branche stellt sich vor.
In: Arnold, D. (Hrsg.):
Intralogistik.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006, S. 6-16.
- [Ham-06] Hammerl, M.; Sauerland, M.; Walch, D.; Weisweiler, S.:
Mitarbeiterqualifizierung und –mobilität: Einflussfaktoren und Auswirkungen
des flexiblen Arbeitereinsatzes im logistischen Umfeld.
Studie aus dem Bayerischen Forschungsverbund Supra-Adaptive Logistik-
systeme (ForLog), 2006.
- [Han-05] Hansl, R.:
Richtig Lagern und Kommissionieren.
F+H Fördern und Heben, 12/2005, S. 720-722.
- [Har-08] Hartweg, H.:
Funkbasierte Staplerortung in einer Eisengießerei.
Tagungsband der 26. Dortmunder Gespräche, 9.-10. September 2008,
Dortmund.
- [HaS-88] Hart, S.; Staveland, L.:
Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and
Theoretical Research.
In: Hancock, P. A.; Meshkati, N. (Hrsg.):
Human Mental Workload.
Amsterdam: North-Holland, 1988, S. 139-183.

- [Hau-94] Hauske, G.:
Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung.
Stuttgart: B. G. Teubner, 1994.
- [Hei-08] Heitec AG:
<http://www.visuelle-dokumentation.de/>
letzter Abruf: 01.03.2009.
- [Her-01] Herbst, D.:
Papierlose Logistik: Wohin führt der Weg?
Logistik für Unternehmen, 6/2001, S. 30-33.
- [HeV-06] Heidenblut, V.:
Trends in der Kommissioniertechnik.
F+H Fördern und Heben, 5/2006, S. 221-223.
- [Hic-08] Hickey, H.:
Contact lenses with circuits, lights a possible platform for superhuman vision.
Internet: <http://uwnews.washington.edu/ni/article.asp?articleID=39094>,
Veröffentlichung 17.01.2008
- [Hil-04] Hille, A.:
Hier spricht der Kommissionierer.
<http://www.logistikpresse.de>, 17.02.2004.
- [Hüb-06] Hübner, D. W.:
Die Rolle des Dienstleisters in der Intralogistik.
In: Arnold, D. (Hrsg.):
Intralogistik.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006, S. 61-67.
- [Iba-05] Ibach, P.; Stantchev, V.; Lederer, F.; Weiß, A.:
WLAN-based asset tracking for warehouse management.
In: IADIS International Conference e-Commerce, 15.-17. Dezember, 2005,
Porto, Portugal.
- [IBM-03] IBM: The Everywhere Displays Project.
<http://www.research.ibm.com/ed/>
letzter Abruf: 05.03.2009.
- [IEC60825] IEC 60825-1:
Safety of laser products.
Genf: International Electrotechnical Commission, 2001.
- [Irr-06] Irrgang, R.:
Pick-by-Light-Anlage schafft Quantensprung.
Logistik für Unternehmen, 4/5-2006. S. 42-44.

- [Ish-97] Ihsii, H., Ullmer, B.:
Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms.
In: Proceedings of CHI 97, Atlanta, Georgia, USA, ACM Press, 1997, S. 234-241.
- [Jan-04] Janzen, K.; Kettler, G.; Oehme, O.:
Rahmenkonzept der Einführung und Benutzerqualifizierung für AR-Systeme.
In: Luczak, H.; Schmidt, L.; Koller, F. (Hrsg.):
Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen.
Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 22, Bd. 17.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S.55-63.
- [Jün-00] Jünemann, R.; Schmidt, T.:
Materialflusssysteme.
Berlin: Springer Verlag, 2. Auflage, 2000.
- [Kam-06] Kampmeier, J.; Cucera, A.; Fritzsche, L.; Brau, H.; Duthweiler, M.; Lang, G. K.:
Eignung monokularer Augmented Reality – Technologien in der Automobilproduktion.
104. Tagung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft "Augenheilkunde in der alternden Gesellschaft - Herausforderung und Chance".
21.-24. September 2006, Berlin.
- [Kat-00] Kato, H., Billinghamurst, M.; Poupirev, I.; Imamoto, K.; Tachibana, K.:
Virtual Object Manipulation on a Table-Top AR Environment.
In: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, ISAR 2000, S. 111-119.
- [Kat-99] Kato, H.; Billinghamurst, M.:
Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-Based Augmented Reality Conferencing System.
In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, IWAR 1999, S. 85-94.
- [Kis-06] Kiss, Á. S.:
3D Visualisierung in einem Warehouse Management System.
Diplomarbeit, Technische und Wirtschaftliche Universität Budapest, 2006.
- [Kla-08] Klaus, P.; Kille, C.:
Die Top 100 der Logistik – 2008/2009.
Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2008.
- [Kle-98] Kleppmann, W.:
Taschenbuch Versuchsplanung.
München: Carl Hanser Verlag, 1998.

- [Kli-01] Klinker, G.; Stricker, D.; Reiners, D.:
Augmented Reality for Exterior Construction Applications.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001, S. 379-427.
- [KIM-09] Klepp, M.:
Update für das Nasenkino.
spiegel online, 11. Januar 2009.
- [Kra-06] Kranke, A.; Pieringer, M.:
Wagen mit Leuchtanzeigen.
Logistik inside, 9/2006, S. 47.
- [Küc-03] Kücherer, K.:
Angereicherte Wirklichkeit.
c't, 16/2003, S. 80-83.
- [Küh-01] Kühlmeyer, M.:
Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure.
Berlin: Springer Verlag, 2001.
- [Kuh-08] Kuhlmann, U.:
Netzhaut-Beamer.
c't, 10/2008, S. 34.
- [Kwi-93] Kwijas, R.:
Kommissionieren heute - Stand der Technik und Verfahren.
Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI Berichte Nr. 1051 – Kommissionieren.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1993, S. 1-10.
- [Lan-08] Lange, E.; Kippels, D.:
Video checkt die ferne Fabrik.
VDI Nachrichten, 04.07.2008, S. 7.
- [Lar-02] Laramee, R. S.; Ware, C.:
Rivalry and Interference with a Head Mounted Display.
http://www.vrvis.at/TR/2002/TR_VRVis_2002_005_Full.pdf
Download: 20.11.2008.
- [Liu-08] Liu, S.; Cheng, D.; Hua, H.:
An Optical See-Through Head Mounted Display with Addressable Focal
Planes.
In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008.
15.-18. September, Cambridge, UK, S. 33-42.

- [Lol-03] Lolling, A.:
Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit bei Kommissioniertätigkeiten.
Dissertation, Universität Dortmund.
Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [Lün-02] Lüning, R.:
Kommissionieranlagen - Erfahrungen und Trends aus Sicht der Betreiber.
F+H Fördern und Heben, 5/2002, S. 296-298.
- [Lün-05] Lüning, R.:
Beitrag zur optimierten Gestaltung des Durchsatzes in Kommissioniersystemen für Stückgüter.
Tagungsband 22. Deutschen Logistikkongress, 2005, S. 182-189.
- [MaH-94] Marquardt, H.-G.; Schütze, O.:
Entwicklungsrichtungen beim Kommissionieren.
In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
Kommissionieren in Industrie und Handel.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1994, S. 1-10.
- [Map-03] Mapp, A. P.; Ono, H.; Barbeito, R.:
What does the dominant eye dominate? A brief and somewhat contentious review.
Perception and Psychophysics, 2/2003, S. 310-317.
- [Mar-06] Mariske, H.-A.; Meyer, A.:
Digitale Telepathie.
c't, 18/2006, S. 88-93.
- [Mat-04] Materialfluss:
Benchmarks fürs order picking.
Materialfluss Markt 2004, S. 34-37.
- [Mel-97] Melzer, J., E.; Moffitt, K. (Hrsg.):
Head Mounted Displays – Designing for the user.
New York: McGraw-Hill, 1997.
- [Men-99] Menk, J.:
Beitrag zur Planung qualitätsfähiger Kommissioniersysteme.
Dissertation, Universität Dortmund.
Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1999.
- [Mer-08] Merker, T.; Hauf, G.; Schmitz, D.; Longhitano, L.; Gassmann, M.; Kempf, S.:
Kompakter Erfolgstyp mit Charakter.
ATZextra, September 2008, S. 6-11.

- [Met-08] Metaio GmbH:
<http://www.metaio.com>
letzter Abruf: 01.03.2009.
- [Mic-05] Microvision, Inc.:
Nomad Augmented Vision System: Laser Safety, 2005.
- [Mie-06] Miebach, J.; Müller, P. P.:
Intralogistik als wichtigstes Glied von umfassenden Lieferketten.
In: Arnold, D. (Hrsg.):
Intralogistik.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2006, S. 20-31.
- [MiJ-08] Milberg, J.:
„Mehr Mut zur Innovation“.
Automobil Produktion Car Innovation, Mai 2008, S. 6-8.
- [Mil-94] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.:
Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum.
SPIE Vol. 2351, Telemanipulator 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 Verlag, 1999, S. 1-16.
- [Mit-65] Mittenecker, E.:
Planung und statistische Auswertung von Experimenten.
Wien: Verlag Franz Deuticke, 5. Auflage, 1965.
- [Miy-08] Miyashita, T.; Meier, P.; Tachikawa, S.; Orlic, S.; Eble, T.; Scholz, V.; Gappel, A.; Gerl, O.; Arnaudov, S.; Lieberknecht, S.:
An Augmented Reality Museum Guide.
In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008.
15.-18. September, Cambridge, UK, S. 103-106.
- [Miz-01] Mizell, D.:
Boeing's Wire Bundle Assembly Project.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001. S 447-467.
- [Moc-08] Mock, W.:
Willkommen in der Parallelwelt.
VDI Nachrichten, 18.04.2008, S. 4.

- [Mol-04] Molineros, J.; Sharma, R.:
Vision-based Augmented Reality for Guiding Assembly.
In Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 277-309.
- [Muc-04] Muckelberg, E.:
Logistik sichert Wirtschaftswachstum.
Logistik für Unternehmen, 11/12 2004, S. 60-65.
- [Muc-05] Muckelberg, E.; Seemann, A.; Irrgang, R.:
„Die Messe war einfach klasse“.
Logistik für Unternehmen, 11/12-2005, S. 6-23.
- [Mue-05] Mueck, B.; Höwer, M.; Franke, W.; Dangelmaier, W.:
Augmented Reality applications for Warehouse Logistics.
In: Abraham, A.; Dote, Y.; Furuhashi, T.; Köppen, M.; Ohuchi, A.; Ohsawa, Y. (Hrsg.):
Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology.
Berlin: Springer-Verlag, 2005, S. 1053-1062.
- [Nas-97] Nash, J.:
Wiring the Jet Set.
Wired Magazine, 05.10.1997.
http://www.wired.com/wired/archive/5.10/wiring_pr.html
- [Nav-99] Navab, N.; Bani-Hashemi, A.; Mitschke, M.: Merging Visible and Invisible:
Two Camera-Augmented Mobile C-arm (CAMC) Applications.
In: Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on
Augmented Reality, IWAR 1999, S. 134-141.
- [Nei-93] Neitzel, U.:
Kommissionieren unter Nutzung moderner Technik - Beispiele realisierter
Anlagen.
Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI Berichte Nr. 1051 – Kommissionieren.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1993, S. 37-53.
- [New-03] NewTec GmbH:
Funkgesteuerte Pick-to-Light-Anlage optimiert Kommissionierung.
Logistik für Unternehmen, 10/2003, S. 60-61.
- [Nie-97] Nielsen, J.:
Usability Testing.
In: Salvendy, G. (Hrsg.):
Handbook of human factors and ergonomics.
New York: John Wiley & Sons, 1997, 2. Auflage, S. 1543-1568.

- [Nor-02] Norman, D. A.:
The Design of Everyday Things.
New York: Basic Books, 2002.
- [Oeh-04] Oehme, O.:
Ergonomische Untersuchung von kopfbasierten Displays für Anwendungen der erweiterten Realität in Produktion und Service.
Dissertation, RWTH Aachen.
Aachen: Shaker-Verlag, 2004.
- [Ohn-93] Ohno, T.:
Das Toyota Produktionssystem.
Frankfurt/New York: Campus, 1993.
- [Ong-04] Ong, S. K.; Nee, A. Y. C.:
A Brief Introduction of VR and AR Applications in Manufacturing.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 1-11.
- [Pat-04] Patron, C.:
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung.
iwb Forschungsbericht 190 und zugleich Dissertation, Technische Universität München.
München: Herbert Utz Verlag, 2004.
- [Pel-01] Peli, E.; Hedges, T. R.; Tang, J.; Landmann, D.:
A binocular stereoscopic display system with coupled convergence and accommodation demands.
SID Symposium Digest of Technical Papers, Juni 2001, Volume 32, Issue 1, S. 1296-1299.
- [Pel-90] Peli, E.:
Visual issues in the use of a head-mounted monocular display.
Optical Engineering, 8/1990, S. 883-892.
- [Pen-06] Pentenrieder, K.; Meier, P.; Klinker, G.:
Analysis of Tracking Accuracy for Single-Camera Square-Marker-Based-Tracking.
Third Workshop on Virtual and Augmented Reality of the GI-Fachgruppe VR/AR, Koblenz, September, 2006.
- [Per-06] perdictum GmbH + Co KG:
Die visuelle Unterstützung von Pick-by-Voice.
Materialfluss Markt 2006, 2006, S. 30.
- [Pie-06] Pieringer, M.:
Gepickt wie gesprochen.
Logistik inside, 7/2006, S. 40-43.

- [Pie-08a] Pieringer, M.:
Im Dienste der Durstigen.
Logistik inside, 10/2008, S. 44-45.
- [Pie-08b] Pieringer, M.:
Mehr Flexibilität.
Logistik inside, 4/2008, S. 42-43.
- [Poo-04] Poost, M.:
Flüssiger Kommissionieren mit Pick-by-Voice.
Logistik für Unternehmen, 9/2004, S. 38-41.
- [Pou-01] Poupayev, I.; Tan, D.; Billinghamurst, M.; Kato, H.; Regenbrecht, H.; Tetsutani, N.:
Tiles: a mixed reality authoring interface.
In: Proceedings of INTERACT 2001, Yokohama, Japan.
New York: IEEE Press, 2001.
- [Pre-07] Precht, P.:
Ausschreibungen von Logistikdienstleistungen: Gegenüberstellung von Industrie- und Logistikdienstleister-Sicht.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 259-270.
- [Pri-05] Prieschenk, H.:
Von der Kommissionierung zur voll mechanisierten Produktion von Auftragspaletten.
Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.):
VDI-Berichte 1882.
Düsseldorf: VDI Verlag, 1994, S. 29-36.
- [Pro-06] proLogistik GmbH:
Kritische Abläufe frühzeitig erkennen.
Materialfluss, 3/2006, S. 21.
- [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. September, Cambridge, UK, S. 13-20.
- [RaJ-83] Rasmussen, J.:
Skills, rules, and knowledge; Signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models.
In: IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, SMC 13, 1983, S. 257-266.

- [Ras-04] Raskar, R.; Beardsley, P.; van Baar, J.; Wang, Y.; Dietz, P.; Lee, J.; Leigh, D.; Willwacher, T.:
RFIG Lamps: Interacting with Self-Describing World via Photosensing Wireless Tags and Projectors.
In: Proceedings of SIGGRAPH 2004, Los Angeles, CA, USA, 2004.
<http://www.merl.com/people/raskar/Sig04/>
- [Rei-02] Reinhart, G.; Patron, C.; Meier, P.:
Virtual- and Augmented Reality in der Montage.
wt Werkstattstechnik online, 1-2/2002, S. 12-15.
- [Rei-03] Reinhart, G.; Zäh, M. F.; Patron, Doil, F.; Alt, T.; Meier, P.:
Augmented Reality in der Produktionsplanung.
wt Werkstattstechnik online, 9/2003, S. 651-653.
- [ReR-08] Reif, R.; Günthner, W. A.:
Pick-by-Vision auf dem Weg in die Praxis.
Logistik für Unternehmen, 11-12/2008, S. 62-65.
- [Rek-00] Rekimoto, J.; Ayatuska, Y.:
CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags.
In: Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments, Elsinore, Denmark, 2000, S. 1-10.
- [Ric-99] Richard, O.:
Prozeßorientiertes Qualitätsmanagement in der Logistik.
Dissertation, Universität Dortmund.
Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1999.
- [Rie-06] Riess, P.; Stricker, D.; Voss, G.; Müller-Wittig, W.:
ULTRA – Ultra Portable Augmented Reality for Industrial Maintenance Applications.
CG Topics, 6/2006, S. 16-18.
- [Rin-07] Rinza, T., Boppert, J.:
Logistik im Zeichen zunehmender Entropie.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 17-28.
- [Rob-04] Robertson, C.; MacIntyre, B.:
Adapting to Registration Error in an Intentbased Augmentation system.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 147-167.
- [Röh-95] Röhler, R.:
Sehen und Erkennen.
Berlin: Springer Verlag, 1995.

- [Rol-01a] Rolland, J. P.; Davis, L. D.; Baillot, Y.:
A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001, S. 67-112.
- [Rol-01b] Rolland, J. P.; Fuchs, H.:
Optical versus Video See-Through Head-Mounted Displays.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001, S. 113-156.
- [Rot-04] Rottenkolber, B., Edelmann, M., Höller, F.:
Gestaltungsempfehlungen für Head-Mounted-Displays.
In: Luczak, H.; Schmidt, L.; Koller, F. (Hrsg.):
Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen.
Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 22, Bd. 17.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S. 27-39.
- [Rüg-02] Rügge, I.:
Technologische und anwendungsorientierte Potenziale mobiler, tragbarer
Computersysteme.
TZI-Bericht 24, Januar 2002.
- [Sad-07] Sadowsky, V.:
Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen.
Dissertation, Universität Dortmund.
Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2007.
- [Sas-08] Saske, B.:
Augmented Reality in der Instandhaltung.
Dissertation, Technischen Universität Dresden.
München: Dr. Hut Verlag, 2008.
- [Sau-07] Sauerland, M.; Walch, D.; Hammerl, M.:
Akzeptanz von Werkzeugen in Planung und Schulung.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 413-423.
- [ScB-07a] Schwerdtfeger, B.; Reif, R.; Frimor, T.; Klinker, G.:
Neue Techniken zur Informationsbereitstellung in der Kommissionierung.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 487-499.

- [ScB-07b] Schwerdtfeger, B.; Alt, T.; Klinker, G.:
Einsatz von Augmented Reality zur aktiven Fehlervermeidung.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 501-508.
- [ScB-08] Schwerdtfeger, B.; Klinker, G.:
Supporting Order Picking with Augmented Reality.
In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008.
15.-18. September, Cambridge, UK, S. 91-94.
- [ScD-05] Schreiber, W.; Doil, F.:
Augmented Reality – eine Schnittstelle zwischen der realen und der virtuellen Fabrik.
In: Schenk, M. (Hrsg.):
Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme.
Magdeburg: Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung, 2005, S. 17-26.
- [ScG-08] Schall, G.; Mendez, E.; Schmalstieg, D.:
Virtual Redlining for Civil Engineering in Real Environments.
In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008.
15.-18. September, Cambridge, UK, S. 95-98.
- [ScJ-03] Schulte, J.:
IT in der Kommissionierung.
Hebezeuge und Fördermittel, 9/2003, S. 400-403.
- [ScL-04] Schmidt, L.; Wiedenmaier, S.; Oehme, O.; Luczak, H.:
Augmented Reality als neue Form der Mensch-Maschine-Interaktion.
In: Luczak, H.; Schmidt, L.; Koller, F. (Hrsg.):
Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented-Reality-Systemen.
Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 22, Bd. 17.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S. 1-14.
- [ScL-05] Schmidt, L.; Wiedenmaier, S.; Oehme, O.; Luczak, H.:
Benutzerzentrierte Gestaltung von Augmented Reality in der Produktion.
In: Stary, C. (Hrsg.):
Mensch & Computer 2005: Kunst und Wissenschaft – Grenzüberschreitungen der interaktiven Art.
München: Oldenbourg Verlag, 2005, S. 51-60.
- [ScM-07] Schöttle, M.:
Bei VR mehr auf die Prozesse schauen.
Automobil Produktion, 3/2007, S. 50-51.

- [ScT-08] Schröder, T:
Blinzeln statt Tippen.
http://www.handelsblatt.com/news/_pv/_p/203116/_t/ft/_b/1444703/default.aspx/index.html, 18.06.2008.
- [ScW-08] Schulz, W.:
Kleinstprojektoren stecken demnächst im Handy.
VDI Nachrichten, 15.08.2008, S. 12.
- [See-05a] Seemann, A.:
Mit Voice-Technologie Kommissionierfehler vermeiden.
Logistik für Unternehmen, 3/2005, S. 6-9.
- [See-05b] Seemann, A.:
Pick-by-Voice hat sich etabliert.
Logistik für Unternehmen, 9/2005, S. 6-9.
- [Str-05] Straube, F.; Pfohl, H.-C.; Günthner, W. A.; Dangelmaier, W.:
Trends und Strategien in der Logistik – Ein Blick auf die Agenda des Logistik-Managements 2010.
Bremen: Deutscher Verkehrsverlag, 2005.
- [STU-08] Schwaiger, M.; Thümmel, T.; Ulbrich, H.:
Virtuell unterwegs und doch am selben Fleck.
TUM Campus, 4/2008, S. 24-25.
- [Sul-68] Sutherland, I. E.:
A head-mounted three-dimensional display.
In: Proceedings of Fall Joint Computer Conference, 1968, S. 757-764.
- [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.
- [Tan-04] Tang, A.; Owan, C.; Biocca, F.; Mou, W.:
Performance Evaluation of Augmented Reality for Directed Assembly.
In Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 311-331.
- [Tap-01] Tappert, C. C.; Ruocco, A. S.; Langdorf, K.A.; Mabry, F. J.; Heineman, K. J.; Brick, T. A.; Cross, D. M.; Pellissier, S. V.; Kaste, R. C.:
Military Applications of Wearable Computers and Augmented Reality.
In: Barfield, W.; Caudell, T. (Hrsg.):
Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality.
Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001, S. 625-647.

- [ten-04] ten Hompel, M.; Schmidt, T.:
Warehouse Management - Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen.
Berlin: Springer Verlag, 2. Auflage, 2004.
- [ten-07] ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.:
Materialflusssysteme.
Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 3. völlig neu bearbeitete Auflage, 2007.
- [Tho-00] Thomas, B.; Close, B.; Donoghue, J.; Squires, J.; De Bondi, P.; Morris, M.; Piekarski, W.:
ARQuake: An Outdoor/Indoor Augmented Reality First Person Application.
In: 4th International Symposium on Wearable Computers, ISCW 2000, Oktober 2000, Atlanta, GA, USA.
- [Tid-95] Tidwell, M.; Johnston, R. S.; Melville, D.; Furness, T. A.:
The Virtual Retinal Display - A Retinal Scanning Imaging System.
In Proceedings of Virtual Reality World '95, 1995, S. 325-333.
- [Tuc-77] Tukey, John W.:
Exploratory data analysis.
Reading: Addison-Wesley, 1977.
- [TuM-00] Tuceryan, M.; Navab, N.:
Single Point Active Alignment Method (SPAAM) for Calibrating an Optical See-through Head Mounted Display.
In: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, ISAR 2000.
- [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. Oktober 2008.
- [VDI3311] VDI-Richtlinie 3311:
Beleglose Kommissioniersysteme.
Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [VDI3590] VDI-Richtlinie 3590-1:
Kommissioniersysteme – Grundlagen.
Berlin: Beuth Verlag, 2002.
- [VDI3657] VDI-Richtlinie 3657:
Ergonomische Gestaltung von Kommissionierarbeitsplätzen.
Berlin: Beuth Verlag, 1993.

- [VDMA-09] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA):
<http://www.vdma.org>.
letzter Abruf: 03.03.2009.
- [Ver-06] Verstaen, J.:
Einfach schneller.
Logistik heute, 7-8/2006. S. 58-59.
- [Vii-97] Viirre, E.; Johnston, R.; Pryor, H.; Nagata, S; Furness III, T. A.:
Laser Safety Analysis of a Retinal Scanning Display System.
Journal of Laser Applications, Volume 9, Issue 4, 1997, S. 253-260.
- [Vog-97] Vogt, G.:
Das neue Kommissionierhandbuch.
Eine Sonderpublikation der Zeitschrift Materialfluss.
Landsberg: Verlag moderne Industrie, 1997.
- [Voi-07a] Voigt K.-I., Schorr, S.:
Die Evolution des Flexibilitätsbegriffs hin zur Vision der Supra-Adaptivität.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 41-52.
- [Voi-07b] Voigt, K.-I., Saatmann, M., Schorr, S.:
Vom Build-to-Stock zum Build-to-Order: Flexibilitätswirksame Auswirkungen auf die Supply Chain.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 64-86.
- [Vos-07] Voss, H.:
Supra-Adaptivität durch Outsourcing.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 219-229.
- [VW-03] Volkswagen AG:
Schlussbericht zum Leitprojekt ARVIKA.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb05/486098710.pdf>,
letzter Abruf: 02.08.2005
- [WaD-07a] Walch, D.; Katzky, U.:
Innovative Mitarbeiterqualifizierung im logistischen Umfeld.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 425-434.

- [WaD-07b] Walch, D.; Boppert, J.:
Adaptives Wissensmanagement - Abschöpfung und gezielte Nutzung von
Mitarbeiter Know-How.
In: Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin: Springer Verlag, 2007, S. 399-412.
- [Wag-05] Wagner, M.:
Tracking with multiple Sensors.
Dissertation, Technische Universität München, 2005.
- [Wal-08] Walter, M.:
MP3-Player verderben wie Frischobst.
LOG., 2/2008, S. 32-33.
- [Web-96] Webster, A.; Feiner, S. ; Macintyre, B.; Massie, W.; Krueger, T.:
Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation.
In: Proceedings ASCE Third Congress on Computing in Civil Engineering,
17.-18. Juni, 1996, Anaheim, CA, USA.
- [Wec-04] Weck, M.; Hamadou, M.; Hoymann, H.; Jahn, D.; Lescher, M.:
Mobile Service Applications for Machine Tools.
In: Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004, S. 237-255.
- [WeE-04] Westkämper, E.; Pfeffer, M.; Dürr, M.:
Partizipative Fabrikplanung mit skalierbarem Modell – Ein Ebenenmodell
zur schrittweisen Verfeinerung der Layouts mit „i-plant“.
wt Werkstattstechnik online, 3/2004, S. 48-51.
- [Wei-08] Weiss, H.:
Gedacht – getan!
VDI Nachrichten, 10.10.2008, S. 3.
- [WeJ-02] Wesselmann, J.:
Kommissioniersysteme auf dem Prüfstand.
F+H Fördern und Heben, 1-2/2002, S. 37-39.
- [Wel-01] Welch, G.; Bishop, G.; Vicci, L.; Brumback, S.; Keller, K.; Colluci, D.:
High-Performance Wide-Area Optical Tracking - The HiBall Tracking Sys-
tem.
In: Presence, Vol. 10, No. 1, Februar 2001, S. 1–21.
- [Wes-08] Wesselowski, R.:
Logistik und Globalisierung.
Interview mit H.-W. Sinn, M. Wittenstein und C. Hahn-Woernle.
F+H Fördern und Heben, 5/2008, S. 284-287.

- [Wie-04] Wiedenmaier, S.:
Unterstützung manueller Montage durch Augmented Reality-Technologie.
Dissertation, RWTH Aachen.
Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- [Wii-08] Nintendo Wii:
<http://de.wii.com/>
letzter Abruf: 01.03.2009.
- [Wöh-02] Wöhrle, T.:
Hörst Du die Stimmen?
Logistik heute, 5/2002, S. 18-20.
- [Wue-07] Wuest, H.; Stricker, D.:
Tracking of industrial objects by using CAD models.
Journal of Virtual Reality and Broadcasting, 4/2007, No. 1, April 2007.
- [Wul-08] Wulz, J.:
Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität.
Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [Zäh-04] Zäh, M. F.; Vogl, W.; Munzert, U.:
Beschleunigte Programmierung von Industrierobotern.
wt Werkstattstechnik online, 9/2004, S. 438-441.
- [Zho-03] Zhong, X.; Liu, P.; Georganas, N. D.; Boulanger, P.:
Designing a Vision-based Collaborative Augmented Reality Application for Industrial Training.
it – Information Technology 1/2003, S. 7-19.

Anhang

Probandencheckliste

[hh:mm]	
00:00	Begrüßung: <ul style="list-style-type: none">• Vergleich eines herkömmlichen Kommissionierprozesses mit Papierliste und zwei Pick-by-Vision-Systemen (mit und ohne Tracking).• Ziel der Versuchsreihe ist es, zu prüfen, ob die Kommissionierung mit Datenbrille einen Fortschritt in der Kommissioniertechnologie bedeutet.• Es soll dabei nicht die eigene Leistung überprüft werden, sondern die Leistung, die mit den jeweiligen Kommissioniertechniken im Vergleich zueinander erreicht werden kann. Außerdem soll die subjektive Beanspruchung des Probanden ermittelt und verglichen
	Einweisung: <ul style="list-style-type: none">• drei verschiedene Versuchsdurchläufe (PL, oTr, mTr)• pro Durchlauf sechs Kommissionieraufträge• möglichst null Fehler bei der Kommissionierung anstreben• möglichst schnell kommissionieren• Vor dem ersten Durchgang und nach jedem Durchgang ist ein Konzentrations-Belastungstest zu machen. Die genauere Beschreibung zu den einzelnen Methoden gibt es vor deren Beginn.
	Lager: <ul style="list-style-type: none">• 4 Zeilen (erste Zahl), an der Vorderseite groß nummeriert• 5 Ebenen (Buchstabe an Position zwei), vom unten (A) nach oben (E) durchnummeriert• je 14 Lagerplätze (Zahl an Stelle 3), von vorne nach hinten durchnummeriert
	Artikelnummer: <ul style="list-style-type: none">• Um Fehler zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Artikelnummer auf dem Auftrag mit der der Ware zu vergleichen.• jeweils auf dem zu entnehmenden Artikel• Bei Medikamentenschachteln ist die Artikelnummer gleich der Zulassungsnummer (Beispiele zeigen: Schrauben, Medikament, Flyer).
	Start und Ende Versuch: <ul style="list-style-type: none">• Der Versuch startet an der Basis (Tisch) auf Signal der Versuchsbetreuung.• Kommissionierwagen steht an der Basis bereit.• Der Wagen muss immer mitgeschoben werden, er darf folglich nicht am Gassenanfang stehen gelassen werden.• Die leeren Sammelbehälter, in welche die Aufträge zu kommissionieren sind, befinden sich direkt neben der Basis.• Die Sammelbehälter werden auf den Wagen gestellt.• Kommissionierung des Auftrags• Nach Vervollständigung des Auftrags wird der Sammelbehälter auf dem Tisch abgestellt.

	<ul style="list-style-type: none"> • Mit dem Abstellen des Sammelbehälters endet der jeweilige Auftrag. • Messung der Gesamtzeit über alle Aufträge und der Kommissionierfehler je Position.
0:10	Persönlicher Fragebogen: Um die Ergebnisse des Versuchsdurchlaufes besser bewerten zu können, sollen die Probanden einen persönlichen Fragebogen ausfüllen. Die Antworten sind freiwillig abzugeben. Nach jedem Durchgang soll der Proband die letzte Seite des Fragebogens ausfüllen.
	Konzentrations-Belastungstest: <ul style="list-style-type: none"> • Der d2-Test wird am Anfang und nach jedem Durchgang durchgeführt (d's mit 2 Strichen darunter und/oder darüber bzw. je einem Strich darüber und darunter sind anzukreuzen). • kein Zeitlimit (wie auch bei Kommissionierung selbst)
00:15	Probelauf: <ul style="list-style-type: none"> • Für den besseren Umgang mit dem System (Dateneingabe, Visualisierung) wird ein kurzer Probelauf durchgeführt. • Pick-by-Vision mit Tracking, Datenbrille und Rucksack anlegen (Helfen beim Aufsetzen der Brille und beim Rucksack) • 2 Probeaufträge (einmal ohne, einmal mit Sammeln) • Danach wird die Technik wieder abgelegt.
00:30	1. Versuchsdurchlauf (ca. 15 Minuten)
00:45	ggf. Abnahme der Datenbrille und des Rucksacks
	Konzentrations-Belastungstest: siehe oben
	Persönlicher Fragebogen zur jeweiligen Technik
	TLX- Beanspruchungstest <ul style="list-style-type: none"> • am Rechner • Schieberegler zu den 6 Fragen einstellen
01:00	2. Versuchsdurchlauf (ca. 15 Minuten)
01:15	ggf. Abnahme der Datenbrille und des Rucksacks
	Konzentrations-Belastungstest: siehe oben
	Persönlicher Fragebogen zur jeweiligen Technik
	TLX- Beanspruchungstest siehe oben
01:30	Versuchsdurchlauf (ca. 15 Minuten)
01:45	ggf. Abnahme der Datenbrille und des Rucksacks
	Konzentrations-Belastungstest: siehe oben
	Persönlicher Fragebogen zur jeweiligen Technik
	TLX- Beanspruchungstest siehe oben
	Interview
02:00	Danke: Als kleines Dankeschön für die Mühe des Probanden, darf dieser einen Teil der kommissionierten Süßigkeiten mitnehmen.
	Ende

Fragebogen zur Evaluierung eines AR-unterstützten Kommissioniersystems

Sehr geehrte Damen und Herren,

Ziel der Versuchsreihe ist es zu prüfen, ob die Kommissionierung mit Datenbrille einen Fortschritt in der Kommissioniertechnologie bedeutet.

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

Ihr Team des fml

Angaben zur Person

Codenummer: _____

Alter: _____ Geschlecht: männlich weiblich

Muttersprache: _____

Benötigen Sie eine Sehhilfe? ja, Brille ja, Kontaktlinsen nein

Angaben zur Kommissioniererfahrung

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

sonstige: _____

Angaben zur 3D-Erfahrung

Haben Sie Erfahrung im Bereich Virtual / Augmented Reality?

keine Erfahrung etwas Erfahrung langjährige/große Erfahrung

wenn ja, mit welchen Technologien:

3D-Visualisierung 3D-Computerspiele Datenbrillen

sonstige: _____

Codenummer: _____

Pick-by-Vision mit Tracking

Notizen

Codenummer: _____

Pick-by-Vision ohne Tracking

Notizen

Codenummer: _____

Mit dieser Methode würde ich am liebsten arbeiten?

Papierliste PbV mit Tracking PbV ohne Tracking

Meine Leistung war am besten mit:

Papierliste PbV mit Tracking PbV ohne Tracking

Mit dieser Methode kann ich mir vorstellen länger zu arbeiten:

Papierliste PbV mit Tracking PbV ohne Tracking

Freie Fragen

z.B. Vorteile, Nachteile, Verbesserungsvorschläge etc.

Nasa TLX

Screenshot des bei der Versuchsreihe eingesetzten Excel-Tools

The screenshot shows a window titled "Nasa TLX" with a yellow background. It contains six rows of sliders, each with a label and a question in German. The sliders are positioned as follows: Mental Demand (low to high), Physical Demand (low to high), Temporal Demand (low to high), Performance (good to poor), Effort (low to high), and Frustration Level (low to high). An "OK" button is located at the bottom center.

Category	Question	Scale
Mental Demand (geistige Anforderung)	In welchem Masse stellte diese Studie geistige Anforderungen, also denken, beobachten, entscheiden?	low to high
Physical Demand (körperliche Anforderung)	Wieviel körperliche Anstrengung war nötig?	low to high
Temporal Demand (zeitliche Anforderung)	Welchen Zeitdruck empfanden Sie bei der Aufgabe?	low to high
Performance (Aufgabenerfüllung)	Wie zufrieden sind Sie mit dem Grad der Aufgabenerfüllung?	good to poor
Effort (Anstrengung)	Wie sehr mussten Sie sich bei der Studie insgesamt anstrengen (geistig und körperlich)?	low to high
Frustration Level (Frustriert)	In welchem Masse fühlten Sie sich bei der Studie gestresst?	low to high

OK

