

Johannes R. Wulz

Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
der Technischen Universität München

Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität

Johannes R. Wulz

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. rer. nat. H. Bubb

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Die Dissertation wurde am 31.01.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.04.2008 angenommen.

Johannes R. Wulz

**Menschintegrierte Simulation in der Logistik
mit Hilfe der Virtuellen Realität**

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

Herausgegeben von:

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

fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugl.: Dissertation, München, Techn. Univ., 2008

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

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

Layout und Satz: Johannes R. Wulz

Copyright © Johannes R. Wulz 2008

ISBN: 978-3-9811819-3-7

Printed in Germany 2008

Neubauer Druck GmbH, München

www.neubauer-druck.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik an der Technischen Universität München.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Herrn Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner bedanken, der mir die Möglichkeit gab, an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und durch vielfältige Unterstützung meiner Promotionsabsicht sowie meiner Forschungsaktivität zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Zäh für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Auf Seite der Industriepartner, die im Rahmen der Forschung mitgewirkt haben, möchte ich mich bei Hr. Ralf Breining von der Fa. ICIDO bedanken. Er hatte stets ein offenes Ohr für meine Anliegen.

Mein Dank gilt weiterhin meiner Kollegin und meinen Kollegen, die durch Diskussion und konstruktive Kritik meine Forschungsaktivitäten beeinflusst haben. Erwähnen möchte ich hier insbesondere Fr. J. Boppert, Hr. M. Schedlbauer, Hr. R. Reif und Hr. D. Walch, die mich mit Rat und Tat unterstützt haben. Besonderer Dank gilt auch noch meinen Kollegen Hr. P. Tenerowicz, Hr. R. Kraul und Hr. S. Meißner, die bereitwillig meine Arbeit Korrektur gelesen und mir damit bei der Überarbeitung geholfen haben.

An dieser Stelle sei auch all meinen Semestranten und Diplomanden gedankt, die zur Realisierung meiner Ideen zur Menschintegrierten Simulation beigetragen haben. In erster Linie sind hier Hr. R. Prechtl, Hr. J. Wimmer, Hr. R. Comerlati und Hr. A. Steghafner zu nennen, die sich unermüdlich durch 3D-Modelle und tausende Zeilen Code gearbeitet haben.

Nicht zuletzt gebührt mein Dank allen anderen Mitarbeitern am Lehrstuhl fml, die bei der Bewältigung der kleinen und großen Probleme des Alltags kollegial geholfen ha-

ben, hier insbesondere dem Systemadministrator, dem Sekretariat und der Werkstatt.

Schließlich gilt meinen Eltern ein ganz besonderes Dankeschön. Sie haben mir Motivation, Kraft und Hilfe gegeben, die notwendig ist, um die mit einer solchen Arbeit verbundenen Belastungen zu bewältigen.

München, im Mai 2008

Johannes R. Wulz

Kurzzusammenfassung

Menschintegrierte Simulation in der Logistik mit Hilfe der Virtuellen Realität

Um schnell und effizient auf die sich ändernden Anforderungen reagieren zu können, werden von der Logistikplanung heute unverzüglich verlässliche Ergebnisse erwartet. Damit dabei auch noch der „human factor“ hinreichend beachtet werden kann, wurde ein neuartiger Simulationsansatz mit dem Namen „Menschintegrierte Simulation“ entwickelt. Dieser auf der Virtual Reality basierende Ansatz ermöglicht es dem Anwender, ein virtuelles Logistiksystem unter realistischen Bedingungen mittels geeigneter Interaktionstechniken (Datenhandschuh, Laufband) und unter soziotechnischen, ergonomischen und leistungstechnischen Aspekten zu untersuchen. Mit einer Versuchsplattform wurde der Ansatz evaluiert. Konkret wurden mit Probanden logistische Kennzahlen in der Realität und der VR ermittelt und zu Evaluierungszwecken verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die in der Virtuellen Realität ermittelten Kennzahlen (z.B. Wegzeit) als realistischer Gradmesser zur Leistungsbewertung herangezogen werden können.

Abstract

Human Integrated Simulation in the field of logistics based on the Virtual Reality technology

Today companies are operating in a very turbulent environment. To quickly and efficiently react to the changes, the logistics planning has to generate reliable results. That at the same time the "human factor" can be adequately observed, a novel simulation approach with the name "Human Integrated Simulation" was developed. This on the Virtual Reality-based approach enables the user to evaluate a virtual logistics system under realistic conditions using appropriate interaction techniques (data glove and treadmill). With an experimental platform the approach was evaluated. For that purpose operating figures were determined for evaluation and comparison purposes with volunteers in the reality and virtual reality. It has been shown that in the virtual reality determined ratios (e.g. way time) are realistic indicators to measure the performance of a logistic system.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Materialflusssysteme – Grundlagen	6
2.1	Einführung in die Logistik	6
2.2	Materialflusssysteme	7
2.2.1	Funktion Fördern	8
2.2.2	Funktion Lagern	8
2.2.3	Funktion Handhaben	9
2.3	Der Mensch im Materialflusssystem	9
2.4	Einführung in die Kommissionierung	11
3	Planung von Materialflusssystemen	16
3.1	Definition und Ursachen	16
3.2	Ablauf der Planung	17
3.2.1	Vorarbeiten	18
3.2.2	Grobplanung	19
3.2.3	Feinplanung und Realisierung	26
3.3	Die Digitale Fabrik als Integrationsplattform der Planung	26
3.4	Der Mensch in der Planung	28
4	Virtuelle Realität Technologie – Grundlagen	31
4.1	Definition	31
4.2	Abgrenzung zu verwandten Technologien	34
4.3	Funktionsweise und Aufbau von Virtual Reality Systemen	36
4.3.1	Das Ausgabesystem	38
4.3.2	Das Eingabesystem	44
4.3.3	Hard- und Softwarearchitektur für die Virtuelle Realität	49
4.3.4	Geometriemodell zur Beschreibung virtueller Räume	54
4.4	Anwendungen der VR-Technologie	56
4.5	Zusammenfassung	62

5	Menschintegrierte Simulation mittels VR	63
5.1	Definition	63
5.2	Einsatzfelder und Zielgruppen in der Materialflussplanung	64
5.2.1	Einsatzfelder	64
5.2.2	Zielgruppen	68
5.2.3	Relevanz der Menschintegrierten Simulation für Einsatzfelder und Zielgruppen	70
6	Konzipierung und Realisierung einer Plattform zur MI-Simulation	71
6.1	Erläuterung des Beispielszenarios „Manuelle Kommissionierung“	71
6.2	Anforderungen an die Menschintegrierte Simulation	73
6.3	Aufbau und Komponenten der MI-Simulationsplattform	75
6.4	Interaktionsgeräte	78
6.4.1	Bewegungsplattform	80
6.4.2	Datenhandschuh	85
6.5	Das 3D-Simulationsmodell	87
6.6	Die MI-Simulation – Software	92
6.6.1	Das MI-Simulationsframework	94
6.6.2	Das Modul Interaktionsgeräte	99
6.6.3	Das Modul Simulationslogik	105
6.6.4	Das Analysemodul	107
6.7	Die Externe Simulationseinheit	109
7	Evaluierung der MI-Simulation	111
7.1	Szenario für den Versuchsaufbau	112
7.2	Probandenprogramm	113
7.3	Versuchsaufbau und -beschreibung Menschintegrierte Simulation	117
7.4	Versuchsaufbau und -beschreibung realer Versuch	121
7.5	Versuchsauswertung	124
7.5.1	Untersuchung der Zeitbausteine der Kommissionierung	124
7.5.2	Auswertung der Fragebögen	131
7.6	Ergebnisinterpretation und Schlussfolgerung	134
8	Zusammenfassung und Ausblick	138
9	Literaturverzeichnis	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit	5
Abbildung 2-1: Logistik im industriellen Umfeld [GÜN-07a].....	7
Abbildung 2-2: Elemente einer Wertschöpfungskette	7
Abbildung 2-3: Begriffe der Kommissionierung [GÜN-07b]	12
Abbildung 2-4: Gestaltungsalternativen der Ablauforganisation.....	14
Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Materialflussplanung [GÜN-07c]	18
Abbildung 3-2: Methoden und Werkzeuge der Strukturplanung.....	20
Abbildung 3-3: Standardplanungswerkzeuge.....	22
Abbildung 3-4: Beispiele für spezialisierte Werkzeuge.....	23
Abbildung 3-5: Methoden und Werkzeuge der Systemplanung	24
Abbildung 3-6: Werkzeuge der Systemplanung	25
Abbildung 4-1: Menschen in der Virtuellen Realität [TUH-08]	32
Abbildung 4-2: Die 3 I's der Virtuellen Realität	33
Abbildung 4-3: Reality-Virtuality Continuum	34
Abbildung 4-4: Interaktives System	36
Abbildung 4-5: VR-System nach dem Interaktionsmodell	36
Abbildung 4-6: Physiologisches Modell des binokularen Sehens [BOR-94].....	39
Abbildung 4-7: Projektionssystem mit passiven Verfahren	40
Abbildung 4-8: CAVE [JVR-08]	41
Abbildung 4-9: Bauformen von HMDs [ALT-02]	41
Abbildung 4-10: Sensics HMD [MIC-08].....	42
Abbildung 4-11: Sensable Phantom Omni [INI-08].....	43
Abbildung 4-12: A.R.T. optisches Trackingsystem [ART-08]	44
Abbildung 4-13: VirtuSphere [VIR-08]	46
Abbildung 4-14: Bewegung auf einer Ebene [VSD-08]	46
Abbildung 4-15: Datenhandschuh [5DT-08]	47
Abbildung 4-16: Datenhandschuh CyberGrasp mit Force Feedback [RSI-08]	48
Abbildung 4-17: Flystick [IMS-08].....	49
Abbildung 4-18: VR-System-Schema mit Hard- und Software	50
Abbildung 4-19: Hardwareaufbau mit Clustertechnik	52
Abbildung 4-20: Softwareprozesse in einem Cluster.....	53

Abbildung 4-21: Szenegraph mit Objekten.....	55
Abbildung 4-22: Mensch bei der Montageplanung [LRZ-08]	57
Abbildung 4-23: Virtual Reality in der Robotik [RUN-07]	58
Abbildung 4-24: Modell eines Arbeitsplatzes mit Mensch [BGE-08].....	58
Abbildung 4-25: Virtueller Anlagensteuerungstest [SCH-08].....	59
Abbildung 4-26: Modell eines Materialflusssystems [RUN-07].....	60
Abbildung 4-27: Darstellung logistischer Kennzahlen in der VR [RUN-07]	60
Abbildung 4-28: Virtueller Kransimulator [IFT-07]	61
Abbildung 5-1: Planung und Menschintegrierte Simulation – Einsatzfelder	65
Abbildung 6-1: Gewähltes Kommissioniersystemszenario [GÜN-07b].....	72
Abbildung 6-2: Grober Ablauf der Kommissionierung	72
Abbildung 6-3: Versuchshalle des Instituts	73
Abbildung 6-4: Anwendungsfalldiagramm für die Versuchsplattform	74
Abbildung 6-5: Konzept der Simulatorplattform.....	78
Abbildung 6-6: Interaktionsgeräte der Simulationsplattform.....	79
Abbildung 6-7: Prinzipskizze Interaktionsgeräte.....	80
Abbildung 6-8: Bewegungsplattform	81
Abbildung 6-9: Regelung mittels Zonen	82
Abbildung 6-10: Regelungsschema der Bewegungsplattform.....	83
Abbildung 6-11: Klassendiagramm der Laufbandregelung	84
Abbildung 6-12: Datenhandschuh mit Marken	86
Abbildung 6-13: Kollisionserkennung mittels Bounding-Spheres	86
Abbildung 6-14: Struktur des 3D-Simulationsmodells	88
Abbildung 6-15: Virtuelle Hand mit Sensoren/Aktoren	89
Abbildung 6-16: 3D Studio Max mit Modell	91
Abbildung 6-17: Softwarekonzept der Simulatorplattform	93
Abbildung 6-18: Simulationsschleife und erweiterte Simulationsschleife	95
Abbildung 6-19: Klassendiagramm des Simulationskernes	96
Abbildung 6-20: Ablaufdiagramm der Routinen bei der Initialisierung.....	98
Abbildung 6-21: Navigationsmodell.....	99
Abbildung 6-22: Ablaufdiagramm der Routinen in FMLTreadmill.....	100
Abbildung 6-23: Codepassagen aus FMLTreadmill	101
Abbildung 6-24: Action-Event Victory Geste	103
Abbildung 6-25: Action-Event – Greifgeste	103

Abbildung 6-26: Ablaufdiagramm der Routinen in FMLGlove	104
Abbildung 6-27: Ablaufdiagramm für Routinen in FMLWorker	106
Abbildung 6-28: Zeitbausteine der Kommissionierung	107
Abbildung 6-29: Zeitnahmeschema.....	108
Abbildung 6-30: Bedienoberfläche der Externen Simulationseinheit.....	110
Abbildung 7-1: Reales Versuchslager am Lehrstuhl fml.....	113
Abbildung 7-2: Auszug der Fragen zur kognitiven Belastung.....	115
Abbildung 7-3: Fragen zu Motivation & Akzeptanz sowie zur 3D-Visualisierung.....	116
Abbildung 7-4: Virtuelles Kommissioniersystem.....	117
Abbildung 7-5: Lagerplatzabbildung in der VR	118
Abbildung 7-6: Proband bei einem Versuchslauf	119
Abbildung 7-7: Ablauf der Versuchsreihe „Menschintegrierte Simulation“	120
Abbildung 7-8: Chronologischer Ablauf der Kommissionierung in der VR	121
Abbildung 7-9: Kommissioniererin mit Liste	122
Abbildung 7-10: Kommissionierliste mit sieben Positionen	123
Abbildung 7-11: Durchschnittliche Gesamtkommissionierzeit	125
Abbildung 7-12: Durchschnittliche Totzeiten	126
Abbildung 7-13: Verlauf der Totzeit.....	127
Abbildung 7-14: Durchschnittliche Wegzeiten	128
Abbildung 7-15: Verlauf der Wegzeit.....	128
Abbildung 7-16: Durchschnittliche Greifzeiten.....	129
Abbildung 7-17: Verlauf der Greifzeit	130
Abbildung 7-18: Verifizierung der automatischen Zeitnahme	131
Abbildung 7-19: Motivation.....	132
Abbildung 7-20: Kognitive Belastung	133
Abbildung 7-21: Qualitative Aussagen zur MI-Simulation	134
Abbildung 7-22: Qualitative Bewertung der Interaktion	134
Abbildung 7-23: Verlauf der durchschnittlichen Kommissionierzeit.....	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Relevanz der MI-Simulation bezüglich Zielgruppen und Einsatzfelder..	70
Tabelle 6-1: Bewertung unterschiedlicher Projektionssysteme [ICI-08]	76

1 Einführung

„Ich kann die Bewegung der Himmelskörper berechnen, aber nicht das Verhalten der Menschen.“ Sir Isaac Newton

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die globale Verflechtung der Wirtschaftssysteme hat das Gefüge der Nationen und Kontinente tief greifend verändert. Als Ursachen hierfür gelten der technische Fortschritt, insbesondere in den Informations-, Kommunikations- und Transporttechniken, sowie die politischen Entscheidungen zur Liberalisierung des Welthandels. Während Unternehmen früher mit einer begrenzten Anzahl meist regionaler Mitbewerber konkurrieren mussten, sind diese nunmehr einem weltweiten Konkurrenzkampf ausgesetzt. Auswirkungen sind nicht nur der stark steigende Preisdruck, sondern auch der Wandel vom Anbieter- zum Käufermarkt. Durch die Angebotsvielfalt sind Unternehmen mehr denn je gezwungen die steigenden Ansprüche der Kunden in Hinblick auf Preis, Qualität, Produktfunktionalität und -individualität sowie Service schnellstmöglich zu erfüllen.

Besonders vom turbulenten Unternehmensumfeld betroffen sind die Produktions- und Logistiksysteme entlang der gesamten „Supply Chain“, deren einzige Konstante heutzutage der Wandel ist. Die Integration neuer, innovativer Produktionseinrichtungen, die Änderung der Produktionsabläufe oder die Einführung komplett neuer Produkte sind nur wenige Beispiele, die eine Adaption der logistischen Strukturen unumgänglich machen. Um schnell und effizient auf die sich ändernden Anforderungen reagieren zu können, werden von der Logistikplanung unter dem Gesichtspunkt der Kosten- und Zeitersparnis schnell verlässliche Ergebnisse erwartet. Mit herkömmlichen Mitteln ist dies jedoch kaum realisierbar, da die Systemplanung eine schwierige und komplexe Aufgabe ist. Probleme resultieren aus der Vielzahl der Verfahren, Techniken und Kombinationsmöglichkeiten, aus den unterschiedlichen Strategien, nach denen sich logistische Systeme aufbauen und organisieren lassen, sowie aus den vielen Einflussfaktoren, von denen Systemauswahl, Dimensionierung, Investition und Kosten abhängen [GUD-04]. Bei all dieser Komplexität ist es beson-

ders problematisch, den „human factor“ noch hinreichend in der Planung zu beachten. Dies ist aber dringend notwendig, da der Mensch trotz aller Rationalisierungsbestrebungen nach wie vor eine zentrale Rolle in der Logistik einnimmt und wesentlich die Leistungsfähigkeit eines logistischen Systems prägt. Logistik besteht nicht nur aus Wertschöpfungsstrategien und innovativer Technik, sondern auch aus den Menschen, die als integraler Bestandteil der Logistik verstanden werden müssen [BLU-06]. Sei es in der Rolle des Planers oder des Operateurs, der Mensch ist unersetzbar.

Durch die Entwicklung und den Einsatz von speziellen Planungssystemen werden Versuche unternommen, dieser Problematik entgegenzuwirken, beispielsweise unter Zuhilfenahme von Menschmodellen für ergonomische Studien oder zur zeitlichen Analyse von Bewegungsabläufen (z.B. MTM, REFA). Dennoch stößt man bei rechnerbasierten Menschsimulationen schnell an die Grenzen, da sich die Individualität des Einzelnen nur unzureichend in Algorithmen im Rechner abbilden lässt und Simulationsergebnisse dadurch oftmals nur wenig Aussagekraft besitzen. Es ist daher wünschenswert, einen neuen Lösungsansatz für die Planung in der Logistik, die den Menschen sowohl als planende Instanz als auch als Betrachtungsgegenstand logistischer Systeme selbst in den Mittelpunkt stellt, zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit befasst sich aus diesem Grunde mit einem vollkommen neuen Simulationsansatz in der Materialflussplanung, der mit dem Namen „Menschintegrierte Simulation“ bezeichnet wird. Basis für diesen Ansatz ist die Technologie der Virtuellen Realität (VR), einer Technik, die es den Menschen erlaubt, durch ein intuitiv handhabbares Werkzeug eine dreidimensionale vom Computer generierte Welt zu erleben. Es soll in dieser Arbeit diskutiert werden, wie durch deren Einsatz die planerische Kreativität des Menschen mit der Möglichkeit logistische Prozesse in Echtzeit in einer virtuellen Umgebung unter quasi-realistischen Bedingungen zu untersuchen genutzt werden kann. Dadurch soll in Zukunft die menschenorientierte Gestaltung komplexer, soziotechnischer Systeme der Logistik erleichtert und vereinfacht werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Lösungsansatzes zur Gestaltung, Planung und Simulation von Materialflusssystemen unter besonderer Berücksichtigung des Faktors Mensch durch die Nutzung der Technolo-

gie der Virtual Reality (VR). Es wird dabei analysiert, ob sich die Virtual Reality Technik hierzu in adäquater Weise einsetzen lässt und welche Anforderungen an ihren Einsatz bestehen. Zu diesem Zweck wird ein Experimentiersystem entwickelt und realisiert, mit dem im Rahmen der Forschung geprüft werden kann, wie die Technologie der Virtuellen Realität die Anforderungen zum Einsatz als Planungs- bzw. Simulationswerkzeug in der Logistiksystemgestaltung erfüllt.

Zum Entwerfen und Realisieren eines Experimentiersystems soll dieser Arbeit der Betrachtungsgegenstand der Kommissionierung zu Grunde liegen. Basierend auf diesem erfolgen anhand experimenteller Versuche spezifische Untersuchungen bezüglich des Einsatzes der VR-Technologie zur Materialflussplanung. Das Szenario der Kommissionierung ist als roter Faden durch die Arbeit zu verstehen, wobei ein reales Simulationssystem für das Anwendungsgebiet der Kommissioniersystemplanung entsteht, das als Ausgangsbasis zur Erschließung weiterer Einsatzfelder gesehen werden kann. Durch die Schaffung bzw. Implementierung innovativer Mensch-Maschine-Schnittstellen, wie einem Datenhandschuh oder einer omni-/unidirektionalen Bewegungsplattform zur Begehung virtueller Welten, können Kommissionieranlagen realitätsnah analysiert und bewertet werden. Dies erfolgt durch die Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Logistikumgebung in einem echtzeitfähigen VR-Simulationsmodell. Logistische Kennzahlen wie beispielsweise Wegzeiten, Greifzeiten bzw. Fehlerquoten in der Kommissionierung etc. lassen sich noch bevor ein reales System existiert in den unterschiedlichsten Szenarien ermitteln, ohne dass der Logistikmitarbeiter in einer Simulation als mathematisches Modell abgebildet werden muss. Der Mensch selbst bringt seine Eigenschaften und Verhalten im Rahmen der Menschintegrierten Simulation in die virtuelle Welt ein und ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung. In der Kommissionierung können so z.B. Prozesse – angefangen von der Auftragsannahme bis zum Pickvorgang – komplett abgebildet und unter arbeitstechnischen, systemtechnischen, geometrischen und ergonomischen Gesichtspunkten evaluiert werden. Dadurch sollen aus Sicht der Planung Probleme frühzeitig erfasst und gelöst bzw. Abläufe optimiert werden, was zur Verkürzung der Planungszeiten und zur Vermeidung von Fehlern bei der Realisierung des geplanten Systems führt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in mehrere aufeinander aufbauende Abschnitte gegliedert (siehe Abbildung 1-1). Der Grundlagenteil befasst sich mit der Darstellung des Betrachtungsgegenstandes dieser Arbeit, der Materialflusssysteme (Kapitel 2) und der Planung (Kapitel 3), um wesentliche Funktionen und Methoden kennen zu lernen. Unter der Rubrik Grundlagen wird darüber hinaus die Virtual Reality (Kapitel 4) einer genaueren Darstellung zugeführt. Dabei soll ein zweckdienliches Verständnis für die Technologie sowie deren Möglichkeiten geschaffen werden, da sie letztlich zur Umsetzung der Simulatorplattform eine wichtige Rolle spielt.

Das auf den Grundlagenteil aufbauende Kapitel 5 beschäftigt sich mit der allgemeinen Definition bzw. Abgrenzung des Begriffes Menschintegrierte Simulation sowie mit der Diskussion potenzieller Einsatzfelder bzw. Benutzergruppen.

Basierend auf dem konkreten Anwenderszenario manuelle Kommissionierung werden Anforderungen an das zu erstellende Experimentiersystem zur Menschintegrierten Simulation ausgearbeitet (Kapitel 6). Anschließend wird die Versuchsplattform konzipiert und ausgestaltet sowie die Rahmenbedingungen und die verwendeten Technologien bzw. Techniken, die zur Erstellung der Plattform notwendig sind, beschrieben.

Gegenstand von Kapitel 7 ist die Evaluierung der Simulatorplattform am Beispiel der manuellen Kommissionierung. In Laborversuchen werden im Rahmen eines Probandenprogramms relevante logistische Kennzahlen (z.B. Zeiten, Fehlerquoten etc.) sowohl in der virtuellen als auch realen Umgebung ermittelt. Nach einer Auswertung und Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse wird die Aussagekraft der in der virtuellen Welt erarbeiteten Parameter dargelegt. Ebenso soll eine Untersuchung der Simulationsumgebung anhand eines nach psychologischen Kriterien erstellten Fragebogens erfolgen, um u. a. die Belastung für die Probanden zu ermitteln. Darauf basierend wird das Einsatzpotenzial der Menschintegrierten Simulation zur Planung und Gestaltung in der Logistik erörtert.

In einer Zusammenfassung erfolgen die komprimierte Darlegung der Ergebnisse dieser Arbeit und ein Ausblick auf weiterführende Forschungs- bzw. Anwendungsmöglichkeiten.

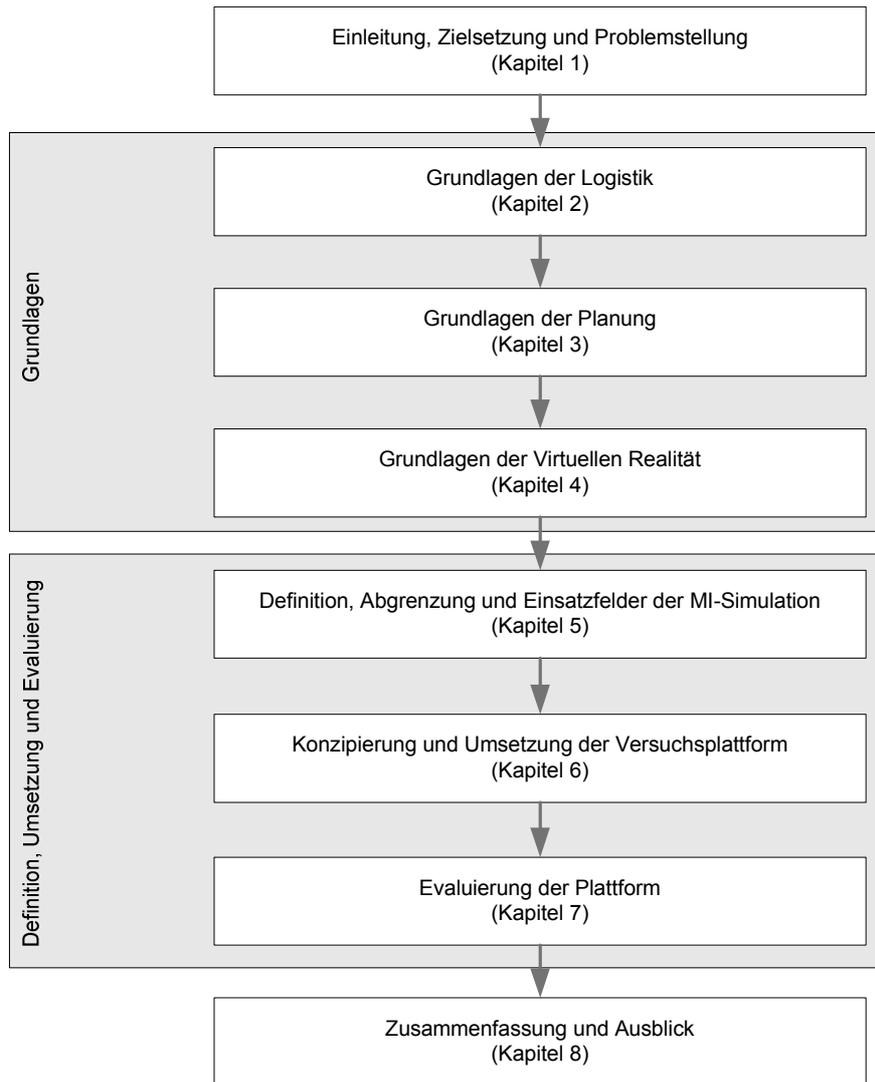


Abbildung 1-1: Aufbau der Arbeit

2 Materialflusssysteme – Grundlagen

Bevor im weiteren Verlauf dieser Arbeit auf den Ansatz der Menschintegrierten Simulation zur Planung eingegangen wird, ist es hilfreich, den Planungsgegenstand Materialflusssystem genauer abzugrenzen und kennenzulernen. Hierzu ist es sinnvoll, zuerst den Themenkomplex der Logistik etwas näher zu betrachten, da dieser die Gestaltung des Materialflusses und dessen Informationsfluss zum Gegenstand hat.

2.1 Einführung in die Logistik

Die Erstellung und Vermarktung von Produkten ist geprägt durch arbeitsteiliges Wirtschaften. Güter werden von Beschaffungsmärkten in die Unternehmen transportiert. Dort werden sie durch die Produktion umgeformt und veredelt und als Produkte des Unternehmens in die Absatzmärkte für die Verwendung beim Kunden geschickt. Diese Güterströme wurden von jeher durch Industrie- und Handelsunternehmen geplant, ausgeführt und überwacht. In den 50er Jahren begann die Management-Literatur in den USA diese Aufgabe unter dem Begriff Logistik zusammenzufassen. Das Council of Logistics Management definiert Logistik als „...den Prozess der Planung, Ausführung und Steuerung eines effizienten, effektiven Fluss von Gütern und Informationen vom Punkt der Herkunft bis zum Punkt des Verbrauchs, um die Anforderungen des Kunden zu erfüllen“ [EVE-00]. Die Logistik hat heute eine bedeutende Stellung inne, da sie den Unternehmenserfolg in erheblichem Maße bestimmt. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Logistik z.B. in Produktions-, Handels-, oder Verkehrsunternehmen führen zu einer terminologischen Differenzierung der Logistik. Gegenstand dieser Arbeit ist die Industrielle Logistik, deren Aufgabe es ist, den Materialfluss und dessen Informationsfluss in der Produktion zu gestalten. Sie hat dabei das Ziel, die richtigen Güter in der richtigen Menge und Qualität zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort zu minimalen Kosten zur Verfügung zu stellen [GÜN-07a]. Im industriellen Umfeld nimmt die Logistik eine wichtige Querschnittsfunktion wahr und deckt die gesamte Kette von der Beschaffung über den unternehmensinternen Materialtransport bis zur Distribution an den Kunden ab (siehe Abbildung 2-1). Die vorliegende Arbeit

behandelt im Weiteren nur den innerbetrieblichen Materialfluss, externe Transporte und Verkehr zwischen verschiedenen Standorten werden ausgeklammert.

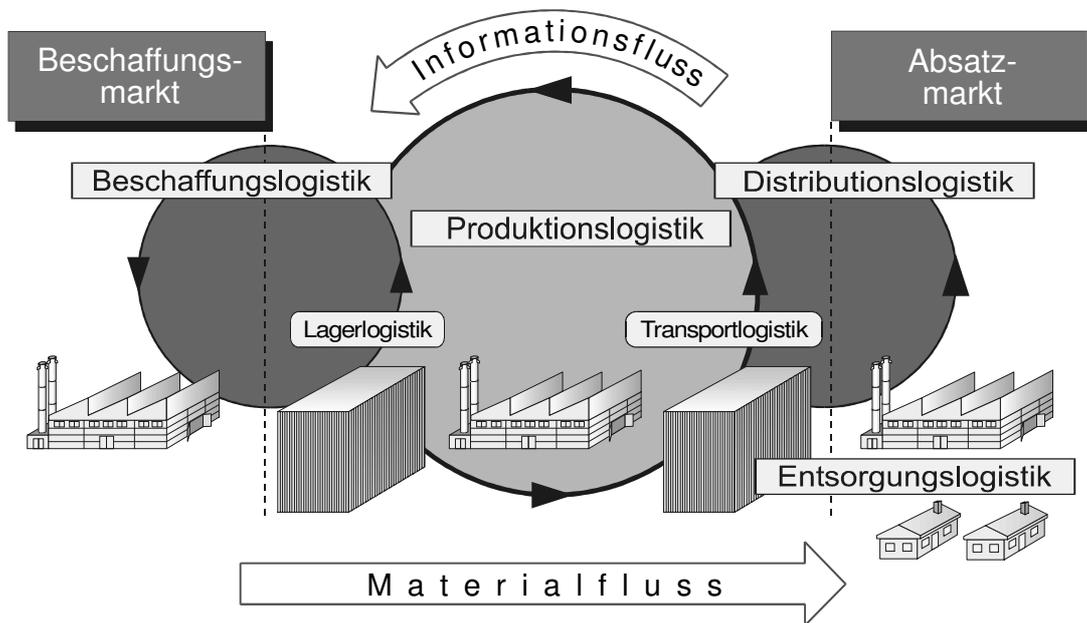


Abbildung 2-1: Logistik im industriellen Umfeld [GÜN-07a]

2.2 Materialflusssysteme

Unter dem Begriff Materialfluss wird die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche verstanden. Dabei lässt sich der Materialfluss in die vier Stufen externer Transport, betriebsinterner Materialfluss, gebäudeinterner Materialfluss und Materialfluss am Arbeitsplatz kategorisieren.

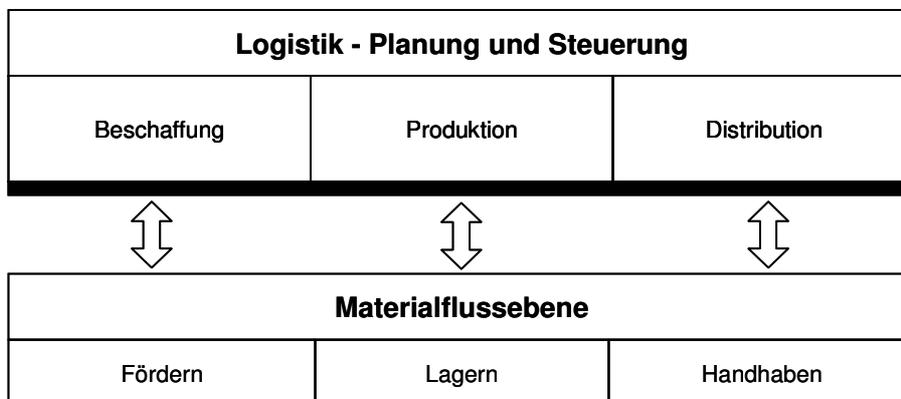


Abbildung 2-2: Elemente einer Wertschöpfungskette

Nach der VDI-2411 werden folgende Funktionen zu einem Materialflusssystem gezählt: Bearbeiten, Prüfen, Handhaben, Fördern, Lagern und Aufenthalt. Neben den genannten Funktionen zählt man heute ebenfalls zum Materialfluss die Funktionen Montieren, Umschlagen, Kommissionieren, Palettieren und Verpacken ([VDI 2411], [GÜN-07b], [EVE-00]).

Auf der Ebene des Materialflusses sind dabei insbesondere die Funktionen des Förderns, des Lagerns und des Handhabens durchzuführen (siehe Abbildung 2-2). Alle weiteren Funktionen eines Materialflusssystem lassen sich in der Regel aus diesen Funktionen zusammensetzen.

2.2.1 Funktion Fördern

Eine der wichtigsten Aspekte innerhalb eines Materialflusssystem ist das Fördern bzw. Transportieren. Als Transport wird generell eine Ortsveränderung eines Transportgutes bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Materialflussgestaltung bezeichnet der Begriff jedoch lediglich den zwischenbetrieblichen Transport (Verkehr). Wird hingegen ein innerbetrieblicher Materialfluss betrachtet, so wird überwiegend von der Funktion des Förderns gesprochen. Fördern charakterisiert somit das Fortbewegen von Fördergegenständen oder Personen in einem System [EVE-00]. Das zu befördernde Element und das Fördermittel bilden die physikalischen Bestandteile eines Fördervorganges. Der Ablauf und die Steuerung werden durch den Förderprozess dargestellt. In Punkto Fördermittel kann auf verschiedenste Elemente der Materialflusstechnik zurückgegriffen werden. Dies umfasst z.B. Rollenbahnen, FTS etc. Neben der Möglichkeit auf automatisierte Fördermittel zurückzugreifen, kommen auch manuell mechanisierte bzw. rein manuelle Systeme zum Einsatz. In diesem Fall ist der Mensch oder der Bediener eines Fördermittels wesentlich für den Ablauf eines reibungslosen Materialflusses in Zusammenspiel mit den physikalischen Elementen sowie dem Prozessablauf verantwortlich.

2.2.2 Funktion Lagern

Das Lagern ist jedes geplante Liegen des Arbeitsgegenstandes im Materialfluss [VDI-2411]. Ein Lager ist ein räumlich abgegrenzter Bereich bzw. eine Fläche zum Aufbewahren von Stück- und/oder Schüttgütern, das mengenmäßig erfasst wird. Starke Veränderungen des Marktes und damit von industriellen Abläufen haben die

Anforderungen an Lagersysteme zum Teil stark geändert. Die statische Funktion des Lagerns hat sich zum dynamischen Funktionselement im logistischen Gesamtsystem verändert. Aufgabe eines Lagers ist das Bevorraten, Puffern und Verteilen von Gütern. Während Vorratslager lang- und mittelfristige und Pufferlager kurzfristige Bedarfsschwankungen ausgleichen sollen, erfüllen Verteillager neben der Bevorratungs- noch eine Kommissionierfunktion. Vor allem im Bereich des Kommissionierens spielt der Mensch meist auf Grund seiner unübertroffenen Fähigkeiten (z.B. kognitive Fähigkeiten) nach wie vor eine wichtige Rolle. Er prägt im Zusammenwirken mit Technik und Prozesssteuerung Faktoren wie Termintreue, Flexibilität etc. und ist damit essentiell für das Funktionieren eines Kommissioniersystems zuständig. Gerade hier ist es unabdingbar, den Menschen verstärkt in die Planung zu integrieren, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Der Gegenstand der Kommissionierung wird deshalb in Abschnitt 2.4 detaillierter ausgeführt.

2.2.3 Funktion Handhaben

Unter der Funktion Handhaben versteht man „das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern“ [VDI-2860]. Teilfunktionen des Handhabens stellen dabei das Speichern, Bewegen, Sichern, Kontrollieren und Verändern von Gütern dar. Das Handhaben kann als eine Funktion sowohl der Fertigung als auch des Materialflusses betrachtet werden. Eine mögliche Handhabungsfunktion im Materialfluss ist z.B. das Palettieren, worunter die Stapelung von Stückgütern zu einem Stückgutstapel nach einem gewissen Muster verstanden wird. Handhabungsfunktionen können entweder von Automaten (z.B. Roboter) oder von Menschen durchgeführt werden. Auf Grund der Greifflexibilität ist der Mensch jedoch meist unübertroffen in der Handhabung. Die stete Zunahme von Produktionstätigkeiten in der Logistik lässt die Funktion des Handhabens auch in diesem Kontext zusehends wichtiger werden.

2.3 Der Mensch im Materialflusssystem

Zur Umsetzung der Materialflussfunktionen Fördern, Lagern und Handhaben kann auf verschiedenste Elemente der Materialflusstechnik zurückgegriffen werden. Dies

umfasst z.B. Stapler, FTS, Lagerbediengeräte, Regalsysteme, Behälter etc. aber auch Elemente der Organisation und der Informations- bzw. Steuerungstechnik.

Trotz der Tatsache, dass sich die Planungsinstanzen zur Materialflussgestaltung aus einem umfangreichen Pool an modernen Techniken bedienen können, ist es bis dato nicht möglich, den Menschen als Operateur (Benutzer eines Mensch-Maschine Systems) aus Materialflusssystemen zu verdrängen. Der Mensch spielt eine äußerst wichtige Rolle für den reibungslosen Ablauf der drei Materialflussfunktionen (Fördern, Lagern, Handhaben). Dies lässt sich vor allem damit begründen, dass bei aller Automatisierung die menschlichen Fähigkeiten (Kognition, Tastsinn etc.) bis heute nicht sinnvoll auf Maschinen übertragen werden können ([ARN-05], [KLA-04]). Deshalb bedeutet Materialfluss heute meist ein Zusammenwirken von Technik und Mensch in einem komplexen, soziotechnischen Mensch-Maschine-System. Die benutzerfreundliche Gestaltung dieser Mensch-Maschine-Systeme ist inzwischen eine unumstrittene Anforderung an neu zu planende Einrichtungen der Logistik. Schlecht gestaltete Systeme können gravierende Nachteile nach sich ziehen, von wirtschaftlichen Einbußen (z.B. durch schlechte Durchsatzleistungen) über gesundheitliche Folgen bis hin zu tödlichen Unfällen [BLU-06].

Auf Materialflussebene übernimmt der Mensch wichtige Aufgaben und prägt so die Leistung, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit eines Systems grundlegend. Beim Fördern beispielsweise dient der Mensch als Bediener von Anlagen bzw. Fördermitteln (z.B. Gabelstapler) oder er ist selbst das Element, das die Raumüberbrückung durch seine reine Muskelkraft durchführt. Das Lagern ist ebenfalls eine Funktion, bei der der Mensch durch seine physischen Fähigkeiten oder als Bediener von Materialflusselementen in den Prozess involviert ist. Zudem übernimmt der Mensch immer mehr Produktionstätigkeiten im Rahmen der Logistik wie z.B. Montage oder Qualitätssicherung. Dies verdeutlicht, welche wichtige Stellung der Mensch als Operateur in der Logistik innehat. Demgemäß ist es wichtig, ihn im Rahmen der Planung in die Systemgestaltung adäquat zu integrieren, damit das Mensch-Maschine-Logistiksystem optimal funktionieren kann.

Auch wenn die im vorangegangenen Abschnitt betrachteten Einzelfunktionen (Fördern, Lagern, Handhaben) als trivial erscheinen mögen, in ihrem gemeinsamen Zusammenwirken kombiniert mit Technik, Organisation, Steuerung und dem einzelnen Individuum ergeben sich daraus hochkomplexe, teils schwer vorherzusagende Systeme. Insbesondere in der Kommissionierung ist dies der Fall, weshalb dieses Mate-

rialflussszenario zur Umsetzung der Simulationsplattform gewählt wurde und stellvertretend für andere Anwendungsbeispiele zu sehen ist. Nachfolgender Abschnitt behandelt dieses komplexe Teilsystem der Logistik eingehender.

2.4 Einführung in die Kommissionierung

Kommissionieren ist laut VDI-Richtlinie 3590 „das Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen (Artikeln) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) auf Grund von Bedarfsinformationen (Aufträgen)“. Diese Definition wird in der entsprechenden Literatur um die Begriffe Position, Bereitstellung und Entnahmeeinheit ergänzt, um den Kommissioniervorgang vollständig beschreiben zu können [EVE-00]. Dabei entspricht eine Position einer Zeile eines Kommissionierauftrages, in der ein Artikel und die von ihm für diesen Auftrag zu entnehmende Menge beschrieben wird. Die Bereitstellungsmenge ist eine unter Verwendung eines geeigneten Ladehilfsmittels physisch von der Gesamtmenge abgegrenzte Teilmenge eines Artikels eines Sortiments. Letztlich bezeichnet die Entnahmeeinheit meist mehrere Stück eines Artikels oder einer Verpackungseinheit. Die Kommissionierung übernimmt also die Schnittstellenfunktion zwischen der sortenreinen Lagerung und dem in der Regel sortenunreinen Auftrag, wobei die „Umformung“ eines lagerspezifischen in einen verbrauchsspezifischen Zustand stattfindet. Kommissioniert werden Kundenaufträge aus Lagerbeständen oder produktionsorientierte Aufträge für Fertigung und Montage [GÜN-07b]. Erwähnenswert ist, dass Kommissionierkosten in vielen Fällen bis zu 50% und mehr der Lagerkosten ausmachen, was verdeutlicht, dass besonderes Augenmerk auf die Planung und Gestaltung zu legen ist. Zu einem Kommissioniersystem gehören die Elemente Kommissionierlager, Fördermittel, Personal und Kommissionierauftrag, die über eine entsprechende Organisationsstruktur miteinander in Beziehung stehen und ein komplexes, soziotechnisches Mensch-Maschine System ergeben.

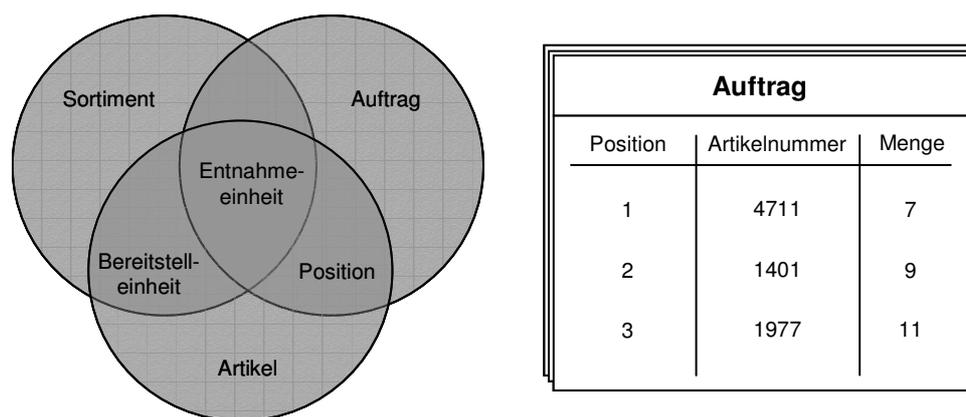


Abbildung 2-3: Begriffe der Kommissionierung [GÜN-07b]

Kommissionierlager

Aufgabe des Kommissionierlagers ist das Lagern der Artikel, die durch Kundenaufträge bestellt werden können. Die Artikel sollen dabei so gelagert sein, dass ein direkter Zugriff zu den Artikeln für die Kommissionierer besteht. Sie können sowohl einem festen als auch einen so genannten chaotischen Lagerplatz zugeordnet werden. Das Lager selbst ist in seiner Struktur durch Bildung eigenständiger Kommissionierzonen unterteilbar. Es kann über integrierte oder separate Kommissionier- und Nachschubgänge verfügen. Zur Lagerung der Waren werden unter anderem Lager-typen wie Regallager oder Durchlaufregallager eingesetzt.

Personal

Trotz hoher Personalkosten wird Personal auch in Zukunft bei der Nachschubversorgung, der Kommissionierung, der Auftragszusammenführung und beim Kontrollieren sowie Disponieren eingesetzt. Bisher können automatische Entnahmeeinheiten die Warenentnahme per Hand nur bei homogenen und bei kleinen Teilen, deren Entnahmeeinheit spezielle Lagerfächer haben, ersetzen. Dementsprechend muss bei der Planung darauf geachtet werden, dass der Mensch optimale Bedingungen zum Arbeiten vorfindet.

Kommissionierauftrag

Die Kundenaufträge werden über entsprechende Informationssysteme meist EDV-Anlagen in Kommissionierunterlagen transformiert, wobei dieser Vorgang jeweils von der Kommissioniermethode abhängig ist. Allgemein wird im Kommissionierauftrag festgelegt, von welchen der im Gesamtsortiment enthaltenen Artikel welche Mengen in welcher Form zusammengestellt werden sollen.

Ein optimales Kommissioniersystem muss auf den speziellen betrieblichen Einzelfall zugeschnitten werden. Hierfür steht eine Reihe von organisatorischen Gestaltungsalternativen zur Verfügung, die sich sowohl auf die Aufbau- als auch auf die Ablaufstruktur des Kommissioniersystems beziehen können. In der betrieblichen Praxis sind vor allem die Gestaltungsalternativen bezüglich der Ablauforganisation von großer Bedeutung, da mit der Gestaltung der Ablauforganisation die Leistung (z.B. Sendungen/Tag) eines Kommissioniersystems entscheidend beeinflusst wird. Die Ablauforganisation (siehe Abbildung 2-4) setzt sich aus den Funktionen

- Nachschieben der Bereitstellereinheiten,
- Bereitstellen der Artikel,
- Fortbewegen des Kommissionierers,
- Entnahme einer Position,
- Abgeben der Teil- oder Gesamtkommission sowie
- Abwickeln und Sammeln der Aufträge zusammen.

Erfolgt die Bereitstellung statisch, so begibt sich der Kommissionierer zur Ware, d.h. er geht oder fährt unter Einsatz eines Transportmittels (z.B. Kommissionierstapler) zum Lagerplatz und entnimmt die geforderte Entnahmemenge. Bei der dynamischen Bereitstellung dagegen wird die Bereitstellereinheit der zu kommissionierenden Position an den stationären Arbeitsplatz des Kommissionierers gebracht. Im Kommissioniersystem mit statischer Bereitstellung können die eindimensionale und mehrdimensionale Fortbewegung unterschieden werden. Bezüglich der Entnahme ist die Manuelle von der Automatischen zu unterscheiden.

Die Abgabe der kommissionierten Positionen kann zentral oder dezentral erfolgen. Bei der zentralen Abgabe wird das Ladehilfsmittel (z.B. Kommissionierwarenbehälter) vom Kommissionierer nach Abschluss der Kommissionierung an einer Basis abgegeben. Erfolgt die Abgabe während des Kommissionierens laufend im Anschluss an die Entnahme, z.B. auf ein im Kommissioniergang verlegtes Transportband, so spricht man von dezentraler Abgabe. Während bei der zentralen Abgabe an der Basis in der Regel der komplette Auftrag bzw. der diesen Kommissionierbereich betreffende Teilauftrag zur Verfügung steht, muss bei der dezentralen Abgabe die Funktion der Zusammenführung als Bestandteil der Organisation an der Basis realisiert werden.

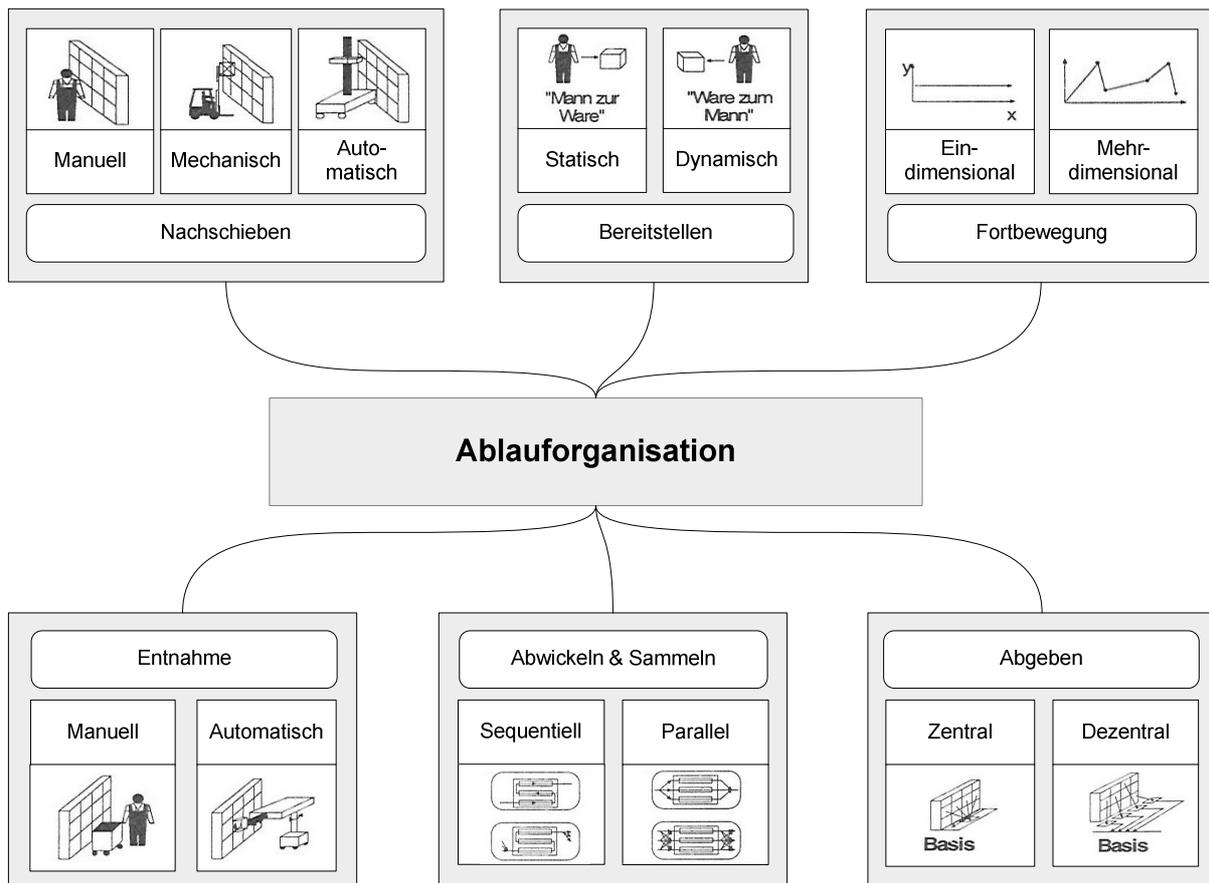


Abbildung 2-4: Gestaltungsalternativen der Ablauforganisation

Die bisher erläuterten Funktionen des Kommissioniervorganges stellen den Ablauf in einem elementaren Kommissioniersystem dar. In einem komplexen Kommissioniersystem – d.h. ein Auftrag durchläuft mehrere Kommissionierzonen und muss zusammgeführt werden – ergeben sich zusätzliche Alternativen der ablauforganisatorischen Gestaltung durch die Realisierung der Funktion Abwickeln und Sammeln.

Die Funktion Abwickeln beinhaltet die Alternativen der auftragsbezogenen und artikelbezogenen Kommissionierung. Bei der auftragsbezogenen Kommissionierung entspricht ein eingehender Kundenauftrag einem Kommissionierauftrag. Bei der artikelweisen Kommissionierung werden Kundenaufträge zusammengefasst und erst in einer zweiten Stufe erfolgt eine kundenbezogene Zerlegung in entsprechende Teilmengen.

Das Sammeln bezieht sich auf die zeitliche Komponente der Abwicklung des Kommissioniervorgangs und besteht aus den Alternativen

- sequentielles Sammeln und
- paralleles Sammeln.

Während bei der sequentiellen Kommissionierung im Normalfall am Ende des Kommissioniervorganges durch alle Bereiche der komplette Kommissionierauftrag zur Verfügung steht, erfordert die parallele Kommissionierung die Zusammenführung der aus den einzelnen Teilbereichen stammenden Teilkommissionen.

Zur effizienten Gestaltung der Ablauforganisation in einem Kommissioniersystem bieten sich also unterschiedliche Varianten an. Welche im speziellen Fall gewählt wird, hängt von den betrieblichen Anforderungen ab und inwieweit die Variante geeignet ist, diese Anforderungen zu erfüllen.

Kommissioniersysteme sind in der Regel mit hohem personellen, organisatorischen und steuerungstechnischen Aufwand verbunden. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist im Wesentlichen die Kommissionierleistung der Kommissionierer und die Weg-/Zeit-Anteile beim Kommissionieren [GÜN-07b].

3 Planung von Materialflusssystemen

Die Betrachtung und Analyse der Planung bzw. des Planungsprozesses bei der Gestaltung von Materialflusssystemen ist für diese Arbeit ein wichtiger Grundstein. Es soll ein Überblick über aktuelle Verfahren, Methoden und digitale Werkzeuge in der Planung gegeben werden. Dies ermöglicht später die Einordnung des Menschintegrierten Simulationsverfahrens in die Planung bzw. die Erörterung wie diese durch einen derartigen Ansatz unterstützt werden kann. Hierzu wird zunächst mit der Definition und den Ursachen der Planung begonnen.

3.1 Definition und Ursachen

Die Planung eines logistischen Systems ist eine Funktion, die der Unternehmensführung dazu dient, ihre vorab gesetzten strategischen Unternehmensziele zu erreichen. In der VDI Richtlinie VDI-2385 wird die Planung allgemein als die „Suche nach einer realisierbaren Lösung für eine Aufgabe in befristeter Zeit mit vorgegebenen Kostenaufwand unter Berücksichtigung aller wesentlichen Faktoren und Einflussgrößen“ definiert [VDI-2385].

Für die verschiedenen Planungsaufgaben werden unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Während z.B. Neu-, Erweiterungs-, Sanierungs- oder Rationalisierungsplanungen aufgabenbezogene Planungsbegriffe darstellen, sagen die Bezeichnungen Ausführungs-, Grob- oder Feinplanung etwas über die Planungsphase und die Genauigkeit der Planung aus. Das betrachtete Planungsgebiet wird durch Begriffe wie z.B. Lager-, Transport-, Materialfluss- oder Fabrikplanung ausgedrückt und bezüglich zeitlicher Aspekte spricht man von Kurz-, Mittel- und Langfristplanung [HEI-06].

Die Ursachen für eine Planung sind vielschichtig, stehen zum Teil aber in enger Beziehung zueinander. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, sind nachfolgend einige Beispiele genannt:

- Neubau von Betrieben bzw. Teilgewerken
- Betriebsverlagerung, -erweiterung und -umstellungen
- Kostenreduktion und Steigerung der Anlagenauslastung

- Einführung eines neuen Produktes
- Erweiterung der Produktionsmenge
- Optimierung der Durchlaufzeiten und Bestände
- Verringerung der Arbeitsunfälle
- Behördliche Auflagen

3.2 Ablauf der Planung

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Planung von Logistiksystemen, die meist unterschiedliche Zielsetzungen aufweisen. Die unterschiedlichen Ansätze können in folgende drei Gruppen gegliedert werden: Allgemeine Planungsvorgehensweisen ohne konkreten Bezug zu Logistiksystemen, Ansätze zur strategischen Logistikplanung und Ansätze zur operativen Planung der Logistik. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist vor allem die operative Planung von Logistiksystemen von Belang, da hierunter die Materialflussplanung und damit konkrete Planungsgegenstände wie Kommissionier-, Lagersysteme etc. fallen [ARN-05]. Trotz einer Vielzahl an Planungsvorgehensweisen, die in der Literatur zu finden sind, lässt sich der prinzipielle Ablauf bei Materialflussplanungen in die vier Hauptphasen

- Vorarbeiten,
- Grobplanung,
- Feinplanung und
- Realisierung

untergliedern [GÜN-07c].

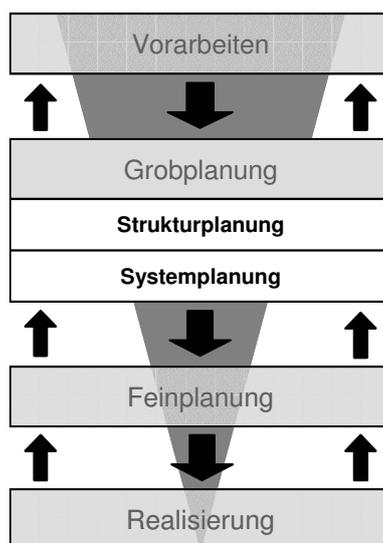


Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei der Materialflussplanung [GÜN-07c]

Innerhalb dieser Hauptphasen erfolgt eine stufenweise Verfeinerung des geplanten Konzeptes, wobei die Ergebnisse einer Phase jeweils als Eingangsgröße für den nachfolgenden Abschnitt dienen. Im realen Planungsprozess ist allerdings eine derartige starre sequenzielle Vorgehensweise nicht umsetzbar, da Entscheidungen zu Zeitpunkten getroffen werden müssen, zu denen noch kein ausgeprägtes Systemwissen vorliegt. Erweisen sich Entscheidungen aus einer vorgelagerten Phase als ungünstig, kann eine Rückkopplung im Rahmen eines iterativen Vorgehens erfolgen und eine Korrektur vorgenommen werden.

3.2.1 Vorarbeiten

Planungsaufgaben für Materialflusssysteme entstehen überwiegend im Zuge von Änderungen, Umstellungen und Erweiterungen sowie auch im Rahmen neu zu schaffender Strukturen auf der grünen Wiese. Im Gegensatz zur Neuplanung sind die Planungsaufgaben, bei denen auf bestehende Strukturen zurückgegriffen wird, durch bereits vorgegebene Anfangszustände beschränkt, wodurch sich die Freiheitsgrade reduzieren. Gerade hier ist es notwendig, alle Rahmenbedingungen im Zuge einer Ist-Analyse hinreichend zu erfassen. Nur so kann sichergestellt werden, dass die gegebenen Voraussetzungen bei der Planung eines neuen Soll-Zustandes bestmöglich genutzt und die Konsequenz aus Zustandsänderungen richtig beurteilt werden [HEI-06].

Die Ist-Analyse erstreckt sich primär auf die Erhebung von Daten des physischen Materialflusses und des damit verbundenen Informationsflusses. Parameter der Ist-

Aufnahme sind Materialflussprozesse, Informationsverarbeitungssysteme und Daten des Fördergutes (z.B. Abmessungen) [ARN-05]. Basierend auf den Ist-Daten wird der gewünschte Soll-Zustand mit Trendberechnungen und Prognosemethoden ermittelt, um die zukünftige Unternehmensentwicklung in die Planung einbeziehen zu können. Daneben fließen ebenso Vorgaben der Geschäftsführung und Planungsziele in die Soll-Daten ein, die im weiteren Verlauf die Grundlage für die Planung bilden.

3.2.2 Grobplanung

Die Grobplanungsphase ist der wichtigste und kreativste Arbeitsschritt in der Planung von Materialflusssystemen, da hierbei wesentliche Merkmale und Eigenschaften des zukünftigen Systems festgelegt werden. Eine Änderung dieser Merkmale und Eigenschaften zu einem späteren Zeitpunkt ist nur mit erheblichem Aufwand möglich, weshalb in der Grobplanung mit besonderer Sorgfalt vorzugehen ist. In der Grobplanung werden basierend auf den Soll-Daten mehrere Lösungsalternativen erarbeitet und auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit überprüft. Diese Phase der Planung ist geprägt durch ein stufenweises, iteratives Vorgehen, bei dem immer wieder Varianten gebildet, beurteilt und ausgewählt werden und so eine ständig zunehmende Detaillierung der zu lösenden Aufgabe erreicht wird.

3.2.2.1 Strukturplanung

Im Vordergrund der Strukturplanung steht der Entwurf verschiedener Ablauffolgen, die sich aus einzelnen Arbeitsschritten, Materialflussoperationen oder Transportvorgängen zusammensetzen. Als Ergebnis dieser Teilphase entsteht mit Hilfe der Layoutplanung eine Reihe von Strukturvarianten, auf denen die nachfolgende Systemplanung aufbaut (siehe Abbildung 3-2).

	Methoden	Werkzeuge
Planen der Abläufe	<ul style="list-style-type: none"> • Ablaufschema • Flussdiagramm 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessplanungs- werkzeuge • Spezielle Werkzeuge
Festlegung der Transportbeziehungen	<ul style="list-style-type: none"> • Sankey-Diagramm • Materialflussgraphen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessplanungs- werkzeuge • Spezielle Werkzeuge
Layoutplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Dreiecksverfahren • Flächenlayout • Blocklayout 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessplanungs- werkzeuge • CAD • Spezielle Werkzeuge
Erstellen von Strukturvarianten	<ul style="list-style-type: none"> • Layoutplan 	<ul style="list-style-type: none"> • CAD • 3D-Systeme

Abbildung 3-2: Methoden und Werkzeuge der Strukturplanung

Auf Basis der Soll-Daten und bereits existierender Randbedingungen werden die Arbeitsvorgänge und Operationen geplant und festgelegt. Unter Arbeitsvorgängen und Operationen sind hierbei alle wesentlichen, zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe notwendigen Arbeitsschritte bzw. alle wichtigen, zur Lösung einer Materialflussaufgabe erforderliche Materialflussoperationen zu verstehen. Das Ergebnis dieses Planungsschrittes sind schematisch dargestellte Abläufe, die die funktionale Verknüpfung und Reihenfolgen der erarbeiteten Arbeitsvorgänge und Operationen verdeutlichen.

Mit dem Festlegen von Fertigungs- und Montageprinzipien bzw. von Lagerprinzipien und -strategien fällt die Entscheidung für bestimmte Organisationsformen, wie Werkstattfertigung, Fließfertigung, Mann zur Ware oder Ware zum Mann. Auf diesen Festlegungen aufbauend müssen die einzelnen Arbeitsschritte und Materialflussoperationen unter räumlichen und zeitlichen Aspekten in entsprechende Funktionseinheiten zusammengefasst werden. Die ablauf- und funktionsgerechte Zuordnung der einzelnen Funktionseinheiten lässt sich dabei in idealen Funktionsschemata darstellen. Die Beziehung zwischen den Funktionseinheiten entspricht in der Realität dem Fördern von Material (Rohmaterial, Werkstücke etc.), wobei sich die einzelnen Fördermengen

aus den Soll-Planungsdaten ableiten lassen. Die Verbindung der Fördermengen mit den zugehörigen Funktionsschemata führt zu mengenmaßstäblichen Flussbildern (z.B. Sankey-Diagramm oder Transportmatrizen).

Im Rahmen der Layoutplanung wird eine möglichst optimale Zuordnung der Funktionseinheiten angestrebt, um den Förderaufwand weitestgehend zu minimieren und gleichzeitig wirtschaftliche Abläufe zu gewährleisten. Dazu werden zum einen die Bereiche nahe beieinander angeordnet, zwischen denen die größten Transportmengen auftreten, zum anderen wird versucht, die Materialrückläufe möglichst gering zu halten. Ein zur Gruppe der heuristischen Verfahren zählendes, konstruktives Layoutplanungsverfahren ist das Dreiecksverfahren. Das Prinzip dieses Verfahrens besteht darin, die Bereiche mit den stärksten Transportintensitäten in einem Layoutkern anzusiedeln und an diesen Kern nach und nach die weiteren Bereiche anzuordnen. Der Name des Verfahrens leitet sich aus dem regelmäßigen Raster mit gleichseitigen Dreiecken ab, das zur Konstruktion verwendet wird. Das Ergebnis dieser Layoutplanung ist eine auf der Grundlage von Fördermengen optimierte Anordnung der Funktionseinheiten, die jedoch weder den Flächenbedarf noch die genaue räumliche Lage der Einheiten zueinander berücksichtigen.

Für das weitere Planungsvorgehen ist es notwendig, den jeweiligen Flächenbedarf der einzelnen Funktionseinheiten (z.B. mittels Kennzahlen) zu ermitteln. Auf Basis der idealen Funktionsschemata können dann mit Hilfe der ermittelten Flächenbedarfe flächenmaßstäbliche Flächenschemata erstellt werden. Die einzelnen Bereiche der flächenmaßstäblichen Funktionsschemata werden in einem Gebäuderaster zusammengeführt, wobei die ideale Anordnung gemäß der Layoutplanung der Funktionseinheiten zu beachten ist. Das Ergebnis dieser Zusammenführung ist das Blocklayout, das auch Ideallayout genannt wird. Die ideale Anordnung der Funktionseinheiten im Blocklayout muss mit den gegebenen Randbedingungen (z.B. baulicher Art) abgestimmt werden. Hierzu werden Strukturvarianten erstellt, die festlegen, wie die Funktionseinheiten auf die Gebäude und in den Gebäuden verteilt werden. Die Varianten ermöglichen es, unterschiedliche Möglichkeiten gegeneinander abzuwägen [HEI-06].

Die in der Strukturplanung eingesetzten digitalen Werkzeuge dienen in erster Linie zur Unterstützung der Planung von Materialfluss, Fertigungs- und Montageprozessen für komplette Werke, Linien oder einzelne Arbeitsabläufe. Mit Hilfe unternehmensspezifischer Bibliotheken für Ressourcen und Betriebsabläufe sowie hinterlegten

3 Planung von Materialflusssystemen

Best Practices lassen sich mit sogenannten Prozessplanungswerkzeugen Prozesse gestalten und unterschiedliche Planungsvarianten entwickeln. Allgemein werden sämtliche für die digitale Prozessplanung relevanten Daten für Produkte (z.B. Stücklisten), Prozesse (z.B. Arbeitspläne) und Ressourcen (Mensch, Maschine etc.) in umfangreichen Datenblättern in der dem System zugrunde liegenden Datenbank hinterlegt. Diese Daten bilden die Grundlage für Auswertungen, Projekt- und Qualitätsberichte sowie als Datenbasis für verschiedenste Planungsabteilungen. Im Planungssystem erfolgt die Verknüpfung von Produkt, Prozess und Ressourcen miteinander, um die Produktionslogik systemseitig zu hinterlegen. Ressourcen können dabei im System als 2D- und 3D-Repräsentation hinterlegt, positioniert und im Gesamtlayout visualisiert werden. Zu Kontrollzwecken bieten Prozessplanungswerkzeuge zudem einen Überblick über den Fortschritt der Planung an Hand der Angabe von unterschiedlichen Planungszuständen (freigegeben, in Bearbeitung etc.) ebenso wie die Möglichkeit, spezielle Informationen über die Datenbank abzufragen (z.B. Investitionskosten) [ZÄH-05].

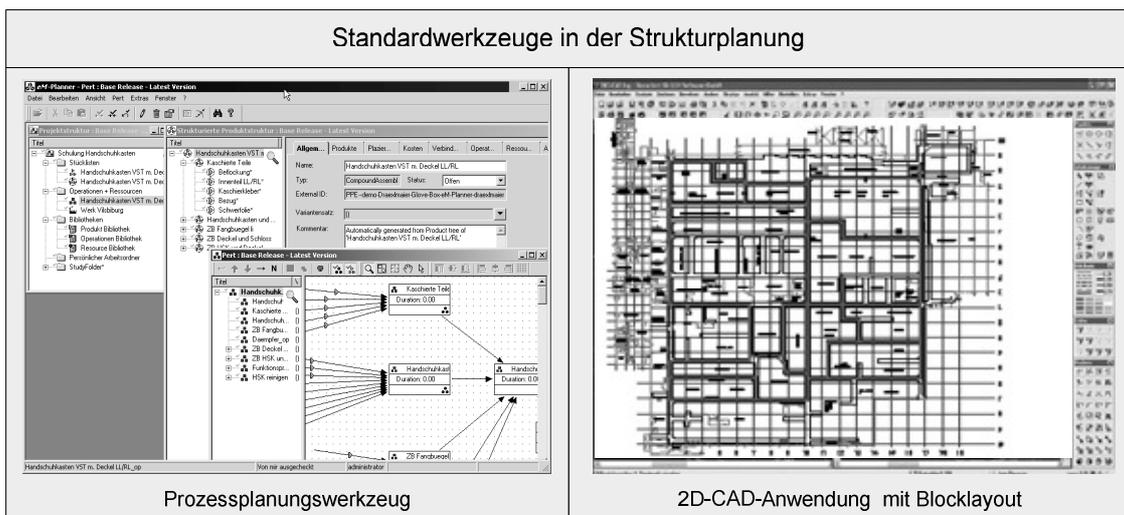


Abbildung 3-3: Standardplanungswerkzeuge

Im Rahmen der Layoutplanung kommen meist 2D-basierte CAD-Systeme zum Einsatz. Diese erlauben, komplexe technische Systeme der Logistik in einem zweidimensionalen Layoutplan abzubilden. Auf Grund der Unübersichtlichkeit sind diese jedoch sehr schwer zu lesen und nicht selten Grund für Fehler in der Planung. Deshalb wird aktuell vermehrt der Einsatz von dreidimensionalen Planungsverfahren erprobt und untersucht.

Bei der Planung und Optimierung von Materialflusssystemen gibt es zusätzlich zu den standardmäßig eingesetzten Werkzeugen eine Reihe weiterer Rechnerwerkzeu-

ge, die für spezielle Aufgabenstellungen entwickelt wurden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, nachfolgend eine Reihe weiterer Werkzeuge zur Planungsunterstützung, die entweder als Stand-Alone Anwendungen oder als Add-On für Standardwerkzeuge umgesetzt werden [GUD-04].

- Erfassung und Berechnung der Planungsgrundlage
- Prognose (z.B. für Bedarfsprognosen)
- Auswahl und Zuordnung von Ladungsträgern
- Investitions- und Betriebskostenrechnung
- Tourenplanung und Fahrwegoptimierung
- Optimierung von Logistiksystemen
- etc.



Abbildung 3-4: Beispiele für spezialisierte Werkzeuge

3.2.2.2 Systemplanung

Im Rahmen der Systemplanung werden für die einzelnen Arbeitsschritte und Materialflussoperationen der entwickelten Strukturvarianten qualitativ geeignete Materialflussmittel ausgewählt. Da bei dieser Auswahl und Zuordnung einzelne Vorgänge zusammengefasst oder aufgeteilt werden können, ergeben sich für jede gewonnene Strukturvariante der vorangegangenen Planungsstufe wiederum eine Reihe von Systemvarianten, also technische Lösungen. Nach der Dimensionierung und Überprüfung der technischen Varianten findet deren Bewertung statt. Auf dieser Grundlage

3 Planung von Materialflusssystemen

kann anschließend entschieden werden, welche Systemvariante in der nachfolgenden Feinplanung und Realisierung verwirklicht wird [HEI-06].

Bei der Dimensionierung der Systemvarianten werden die Beschreibungsgrößen der Materialflusssysteme quantitativ festgelegt. Dabei sind zeitunabhängige Größen (z.B. geometrische Abmessungen) und zeitabhängige Größen (z.B. Geschwindigkeiten) zu unterscheiden. Die nachfolgende Bewertung der Varianten basiert auf der Wirtschaftlichkeit sowie weiteren quantitativen (z.B. Leistungsdaten aus Simulation) und qualitativen (Sicherheit, Erweiterbarkeit usw.) Kriterien.

Aufbauend auf den bereits erarbeiteten Strukturvarianten werden von den sinnvollen und funktionsfähigen Systemvarianten der Auswahl- und Dimensionierungsphase Groblayouts erstellt. Groblayouts stellen konzeptbestimmende und investitionsbeeinflussende Aspekte dar. Sie enthalten Gebäudegrundrisse und -abmessungen, Lage und Größe von Funktionseinheiten, wichtige Anlagen und Maschinengruppen und eine prinzipielle Darstellung der eingesetzten Transport- und Lagersysteme.

	Methoden	Werkzeuge
Auswahl geeigneter Materialflussmittel	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche 	<ul style="list-style-type: none"> • Kataloge • Internet
Dimensionierung der Materialflusssysteme	<ul style="list-style-type: none"> • Materialflussmatrizen • Statische Dimensionierung • Simulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessplanungswerkzeuge • Ablaufsimulation • Spezielle Werkzeuge
Bewertung der Systemvarianten	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation • Wirtschaftlichkeitsrechnung • Nutzwertanalysen 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessplanungswerkzeuge • Simulationstools • Spezielle Werkzeuge
Erstellen von Groblayouts	<ul style="list-style-type: none"> • Layoutplan 	<ul style="list-style-type: none"> • CAD • 3D-Systeme

Abbildung 3-5: Methoden und Werkzeuge der Systemplanung

Die Phase der Systemplanung wird oft durch den Einsatz der sogenannten Ablaufsimulation unterstützt. Diese hilft beim Entwurf sowie bei der Visualisierung und Optimierung von logistischen Prozessen. Die meist objektorientierte Technologie erlaubt

es, gut strukturierte hierarchische Materialflussmodelle und wieder verwendbare Anlagenobjekte zu erstellen. Betrachtet werden hierbei die externe und interne Lieferkette, die Produktionsressourcen und alle relevanten Produktions- und Geschäftsprozesse. Das Ablaufsimulationssystem besteht im Allgemeinen aus einzelnen Elementen, die jeweils z.B. eine Bearbeitungsstation, einen Puffer, einen Werker, eine Förderstrecke oder eine Steuerungsmethodik darstellen, sowie den Verknüpfungen dieser Elemente. Zu jedem Element können Daten zu Zeiten, Störungen, Ein- und Ausgangssteuerungen etc. hinterlegt werden. In so genannten Methodenbausteinen lassen sich zusätzlich Steuerungslogiken, die nicht in Standardelementen enthalten sind, in die Simulation integrieren. Nach entsprechenden Simulationsläufen im Ablaufsimulationssystem erfolgt über unterschiedliche Graphen und Statistiken die Auswertung der Ergebnisse, wie beispielsweise die Auslastung der Ressourcen. Auf Basis der in der Simulation gewonnenen Ergebnisse können Prozesse dargestellt, Steuerungslogiken überprüft und das Gesamtsystemverhalten überprüft werden, zum Beispiel um vorhandene Engpässe zu diagnostizieren. Darüber hinaus sind eine Auslegung von Fördersystemen und die Dimensionierung von Puffern und Lagern unter Berücksichtigung der Systemdynamik möglich ([ZÄH-05], [GÜN-07a]). Die Ablaufsimulation bietet die optimalen Voraussetzungen, um dynamische Systeme zu simulieren und dadurch deren Verhalten zu erfassen. In der Systemplanungsphase finden ähnlich der Strukturplanung zudem CAD-, Prozessplanungs- und spezielle digitale Werkzeuge Anwendung.

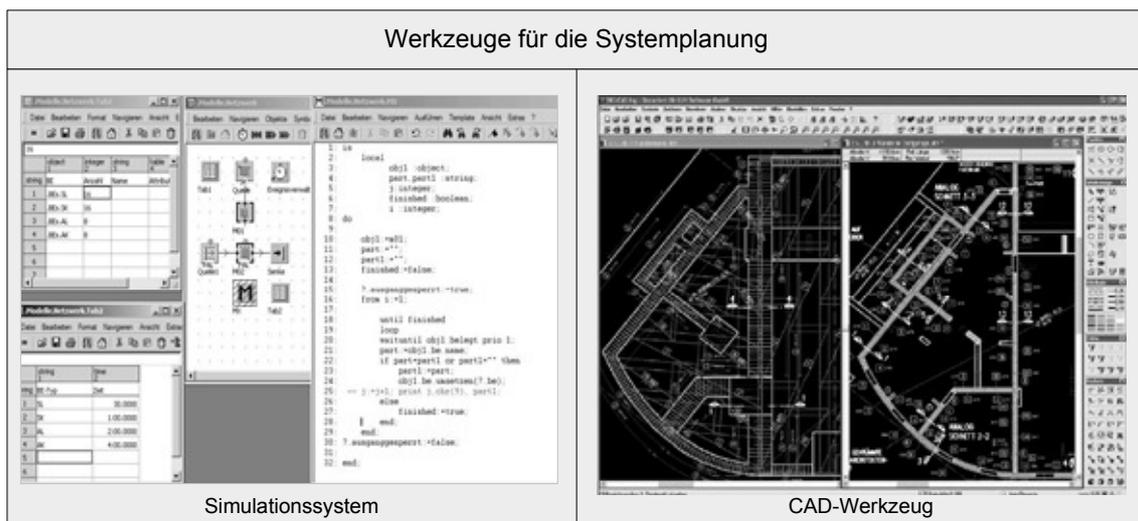


Abbildung 3-6: Werkzeuge der Systemplanung

Virtual- oder Augmented Reality Technologien werden derzeit nicht zur Planung in der Logistik eingesetzt. Diese Techniken sind hauptsächlich Gegenstand von Forschungseinrichtungen. In Kapitel 4.4 findet sich eine Darstellung aktueller Anwendungsszenarien der Virtual Reality sowohl aus dem Bereich der Forschung als auch dem betrieblichen Alltag in anderen Anwendungsbereichen.

3.2.3 Feinplanung und Realisierung

Im ersten Schritt der Feinplanung werden die bisherigen Planungsdaten überprüft, ergänzt und detailliert, so dass auf dieser Grundlage eine Weiterentwicklung stattfinden kann. Nach der Überarbeitung der Planungsdaten werden je nach Notwendigkeit und Finanzierbarkeit die Anzahl und die Reihenfolge der Realisierungsstufen bestimmt. Anschließend wird der Planungsumfang der ersten Stufe je nach Größe in Teilbereiche gegliedert, die einer verfeinerten Strukturplanung, Systemplanung und Dimensionierung unterzogen werden. Letztlich erfolgen die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen und die Bewertung der eingehenden Angebote.

Bei der Realisierung werden alle geplanten Arbeiten und Maßnahmen von den beauftragten Firmen durchgeführt. Diese Phase umfasst vor allem Koordinierungs-, Überwachungs- und Prüfarbeiten. Nach Abschluss der Montage- und Einrichtungsarbeiten findet eine Abnahmeprüfung für alle Anlagen und Maschinen statt. Erst danach kann die Übergabe an den Auftraggeber erfolgen [HEI-06].

3.3 Die Digitale Fabrik als Integrationsplattform der Planung

Der vorangegangene Abschnitt zeigt Methoden und Werkzeuge der Logistikplanung auf. Die Werkzeuge stellen dabei meist Insellösungen dar und verfügen über unzureichende Schnittstellen zu anderen Systemen, wodurch die Planung als Gesamtes ineffizient wird. Industrie wie auch Forschungseinrichtungen haben aus diesem Grund unterschiedlichste Forschungsinitiativen gestartet, die zum Ziel haben, einen ganzheitlichen Ansatz zur durchgängigen Entwicklung und Planung mittels digitaler Methoden zu ermöglichen.

Die Digitalisierung von Prozessen der Entwicklung, Produktionsplanung und Produktion hatte erste Ansätze in der so genannten „CIM-Fabrik“ in den 80er und 90er Jah-

ren. Der ganzheitliche Ansatz scheiterte an der Beherrschbarkeit der Datenflut sowie den methodischen, soft- und hardwareseitigen Voraussetzungen [SCH-05]. Durch das Voranschreiten der Technologien und eingesetzten Methoden im Bereich der Entwicklung und Fabrikplanung ist die Realisierung eines ganzheitlichen, durchgängigen Ansatzes zur Entwicklung, Produktionsplanung und Produktion in greifbare Reichweite gerückt. Hierzu wurde der Begriff der Digitalen Fabrik geprägt. Die Digitale Fabrik bildet alle Aspekte einer Fabrik im digitalen Modell ab, mit dem Entwickler und Planer verschiedene Prozesse, Systeme und Varianten planen und simulieren können. Die VDI-Richtlinie definiert die Digitale Fabrik als den Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen und Methoden, unter anderem der Simulation und 3D-Visualisierung. Ihr Zweck ist die ganzheitliche Planung, Realisierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Fabrikprozesse und Ressourcen in Verbindung mit dem Produkt [VDI-4499], wobei der Fokus auf dem gesamten Fabriklebenszyklus liegt. Dadurch sollen in erster Linie Rationalisierungs- und Qualitätspotenziale erschlossen werden.

Grundlage der Digitalen Fabrik, die auch als Integrationsplattform für unterschiedliche digitale Werkzeuge zu verstehen ist, ist eine durchgängige Datenbasis. Durch Datenmanagementsysteme wird die Datenbasis verwaltet und über ein Workflow-Management allen Beteiligten bzw. Systemen zur Verfügung gestellt. Zur Umsetzung des Ansatzes der Digitalen Fabrik müssen auf die Datenbasis aufbauend für verschiedene Aufgaben unterschiedliche Werkzeuge geschaffen bzw. integriert werden. Dies sind:

- CAD-Applikationen
- Visualisierung/VR-AR
- Produkt- und Prozessplanung
- Layoutplanung
- Linienausstattung
- Arbeitsplatzgestaltung
- Zeitwirtschaftssysteme
- Maschinenprogrammierung
- Monitoring

- Teleservice
- Dokumentation
- etc.

Die Digitale Fabrik wird zusehends ein wesentlicher Erfolgsfaktor in der Fabrik- bzw. Logistiksystemplanung, da sie Systemlücken schließt. Sie bezieht auch Werkzeuge mit ein, die den Menschen im Rahmen seiner planerischen Tätigkeit unterstützen. Die Virtuelle Realität spielt in der Digitalen Fabrik eine bedeutsame Rolle in der Kommunikation und interdisziplinären Zusammenarbeit sowie zur Simulation produktionstechnischer Fragestellungen, wobei Fragestellungen der Logistik weitgehend ausgeklammert werden. Die Menschintegrierte Simulation kann als eine sinnvolle Erweiterung der Palette der Werkzeuge der Digitalen Fabrik angesehen werden. Sie soll die Planung vereinfachen und den Menschen bei komplexen Tätigkeiten unterstützen.

3.4 Der Mensch in der Planung

Als einer der ersten Schritte beim Aufbau einer Wertschöpfungskette bietet die Planungsphase (insbesondere die Grobplanung) den größten Spielraum, in dem einerseits grundlegende Entscheidungen getroffen, andererseits auch die meisten Fehler gemacht werden. Um diese Fehler möglichst zu vermeiden, sind zur Unterstützung des Planers zusätzlich zu den bewährten Methoden (z.B. Dreiecksverfahren in der Layoutplanung) mittlerweile rechnerbasierte Werkzeuge im Einsatz, die die unterschiedlichsten Aufgabenbereiche abdecken (siehe Abschnitt 3.2). Meist zur Auslegung komplexer automatisierter Abläufe eingesetzt, stoßen diese Werkzeuge schnell an ihre Grenzen, sobald das komplexe System Mensch mit der Planung in Abstimmung gebracht werden soll. Der Trend zeichnet sich in den letzten Jahren zwar mehr in Richtung Automatisierung ab, jedoch kann in den meisten Bereichen (siehe Abschnitt 2.3) nicht auf den Menschen verzichtet werden. Dies zeigt sich in der Logistik beispielsweise besonders in der Warenkommissionierung, in der zwar bestimmte Abläufe maschinell vollzogen werden, der Großteil jedoch manuell von Hand geschieht.

Insbesondere wird in der Materialflussplanung (siehe Abschnitt 3.2.2.2) häufig die Ablaufsimulation, eine Methode zur Verhaltensanalyse logistischer Systeme, einge-

setzt. Während automatisierte Systeme gut abgebildet werden können, sind manuelle Systeme mit dem Faktor Mensch nicht hinreichend in Simulationsmodellen modellierbar. Deshalb kommt es immer wieder zu Fehleinschätzungen im Rahmen der Planung. Diese Lücke soll die Menschintegrierte Simulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik schließen, in dem in der virtuellen Welt ermittelte, logistische Kennzahlen beispielsweise in die Ablaufsimulation einfließen und so die Qualität der Modelle verbessern. Die Menschintegrierte Simulation kann somit als sinnvolle Ergänzung zur Ablaufsimulation betrachtet werden, bietet aber auch völlig neue Möglichkeiten als eigenständige Simulationstechnik. Beispielsweise können angefangen von ergonomischen Studien bis hin zur Untersuchung komplexer soziotechnischer Sachverhalte komplette Materialflusssysteme zur Gänze unter Einbeziehung des Menschen simuliert und analysiert werden. Der Planer erhält dadurch völlig neue Möglichkeiten, seine planerische Kreativität zu entfalten sowie die von ihm geplanten Systeme abzusichern. Zudem steht im Rahmen der Planung bzw. Schulung gleichzeitig ein Werkzeug zum Training der Logistikmitarbeiter zur Verfügung. Dadurch können die heute in der Logistik üblichen Einweisungen von operativen Werkern und das darauf folgende „learning by doing“ unter Aufsicht eines Meisters ergänzt werden. Im Gegensatz zu dieser zeitaufwendigen Anlernmethode bietet die Menschintegrierte Simulation den Vorteil, dass sie Mitarbeiter realitätsnah abseits der laufenden Logistikprozesse vorbereiten können. Daneben können Logistikmitarbeiter erstmals auch in die Planungsphase durch die Virtuelle Realität mit eingebunden und deren Know-How effizient abgeschöpft werden [GÜN-07d].

Neben der Möglichkeit den Menschen als Betrachtungsgegenstand der Logistik adäquat in die Planung zu integrieren, ergeben sich auch für den Planer als Nutzer von Planungswerkzeugen wesentliche Vorteile. Dieser kann sich heute aus einem recht umfangreichen und vielseitigen Arsenal von Methoden und Planungstechniken bedienen, wobei die meisten Hilfsmittel den Benutzer nicht als zentrales Element berücksichtigen. So besteht beispielsweise beim Einsatz von speziellen digitalen Werkzeugen, die sich spezifischer Berechnungsformeln und Algorithmen bedienen, die Gefahr, falsche Ergebnisse zu erhalten, die daraus resultieren, dass die Programme u. a. zu stark vereinfacht, zu komplex, undurchschaubar, unverständlich oder zu starr sind [GUD-04]. Aus blindem Vertrauen in die Ergebnisse, die meist sehr abstrakt in Form von Tabellen, 2D-Grafiken und Layouts bzw. schematischen Bildern dargestellt sind [ARN-05], werden dann falsche Konsequenzen gezogen. Um dies zu vermei-

den, ist der Einsatz der Virtual Reality zur Unterstützung des Menschen zur Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung sinnvoll.

Generell kann durch die aufgeführten Aspekte gezeigt werden, dass sich durch die Nutzung der Menschintegrierten Simulation im logistischen Planungsprozess der Mensch in der Planung entsprechend unterstützen lässt. Eine detaillierter Ausarbeitung der Einsatzpotenziale in der Planung sowie die Definition des Begriffes der Menschintegrierten Simulation erfolgt in Kapitel 5. Zuvor wird noch der Themenkomplex der Virtuellen Realität behandelt.

4 Virtuelle Realität Technologie – Grundlagen

Virtual Reality oder zu Deutsch Virtuelle Realität (VR) ist inzwischen zu einem Trendbegriff geworden, der meist mit Innovation und High-Tech in Verbindung gebracht wird, dessen Grenzen im Gebrauch als Trendbegriff aber verschwimmen. Nachfolgend werden deshalb beginnend bei einer Definition der VR über die verschiedenen eingesetzten Teiltechnologien bis hin zu den unterschiedlichen Anwendungsgebieten dieser Technik die Grundlagen behandelt.

4.1 Definition

Virtual Reality, Cyberspace, Virtual Environment (VE), virtuelle Umgebung und viele andere Begriffe stehen für ein Teilgebiet der Computergrafik, für eine neuartige Mensch-Maschine-Kommunikation, die seit Anfang der neunziger Jahre immer mehr an Bedeutung gewinnt [SYM-00]. In der vorliegenden Arbeit soll der Begriff „Virtual Reality“ oder zu Deutsch „Virtuelle Realität“, kurz auch VR, angewandt werden, da er auch in der Literatur am weitesten verbreitet ist.

Nachdem sich Ende der achtziger Jahre nur wenige ausgewählte Forschungseinrichtungen vornehmlich aus dem militärischen Bereich mit der VR beschäftigten, wurde dieses Thema Anfang der neunziger Jahre für breitere Anwenderkreise interessant. Gründe hierfür waren vor allem die Performance-Steigerung sowie der Preisverfall der benötigten Hardware. Somit wuchs der Kreis der potenziellen Anwender Jahr für Jahr bis heute ständig weiter, und es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Trend fortsetzt.

Der Begriff Virtual Reality wurde 1989 von Jaron Lanier geprägt und wird seither auf dem Forschungsgebiet der VR auf unterschiedlichste Art und Weise gebraucht ([BOR-94], [BUR-93]). Die Hintergründe hierfür finden sich hauptsächlich in der Mannigfaltigkeit der Themengebiete, die in diesen Oberbegriff einfließen. Es ist dementsprechend nicht trivial, eine allgemeingültige Definition für den Begriff Virtual Reality anzugeben. Eine in der Literatur oft angewandte Festlegung geht davon aus, dass es sich bei VR um eine neuartige Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine handelt. Burdea definiert sie folgendermaßen: „Virtual Reality is a high-end user interface that

involves real-time simulation and interactions through multiple sensorial channels. These sensorial modalities are visual, auditory, tactile, smell, taste, etc.” [BUR-93]. Der Begriff bezeichnet dabei eine den menschlichen Sinnen vorgetäuschte, künstlich erzeugte Umgebung, die es ermöglicht, dreidimensionale rechnerbasierte Modelle realitätsnah zu erleben (siehe Abbildung 4-1), wobei wesentliche Charakteristiken die Interaktions- und Echtzeitfähigkeit sind. Besonders eng verknüpft ist die VR mit dem Begriff der Interaktivität. S.K. Ong und A.Y.C. Nee beschreiben die Virtual Reality mit den drei Dimensionen des Raums und der Dimension der Zeit als eine 4D Simulation der „realen Welt“ [ONG-04] mit den entsprechenden Interaktionsschnittstellen. Die Aufgabe eines optimalen VR-Systems besteht darin, die Sinne derart zu stimulieren, dass sich der Nutzer vollkommen in die VR integriert fühlt. Dazu kann er über die VR-Schnittstelle mit Objekten der virtuellen Umgebung direkt interagieren. Somit ist die Virtuelle Realität im Grunde eine Schnittstelle, deren Ziel es ist, eine künstliche Welt zu schaffen, die von der realen Welt im Idealfall nicht zu unterscheiden ist.



Abbildung 4-1: Menschen in der Virtuellen Realität [TUH-08]

Eine signifikantere Definition der VR erfolgt über die sogenannten 3 I's, Imagination, Interaktion, Immersion (siehe Abbildung 4-2), die wie folgt zu charakterisieren sind:

- Immersion des Benutzers in die virtuelle Umgebung durch Anpassen der Position, Blickrichtung und Objektinteraktion in Echtzeit (immersive Umgebung)
- Interaktion mit dem virtuellen Modell direkt in der immersiven Umgebung

- Imagination durch die der Realität nachempfundene dynamische Darstellung von Szenen in der immersiven Umgebung

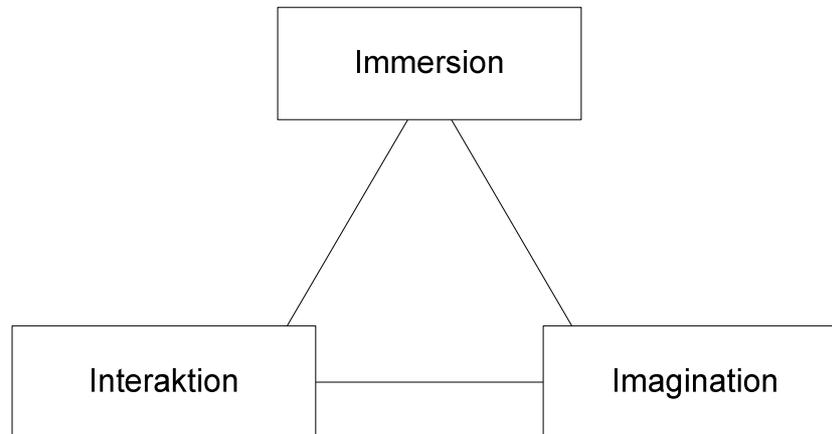


Abbildung 4-2: Die 3 I's der Virtuellen Realität

Der Fachbegriff der „Immersion“ steht für die Eigenschaft der Virtuellen Realität, wie gut der Mensch in die virtuelle Umgebung integriert ist. Anders ausgedrückt gibt der Immersionsgrad an, wie weit man sich mit dem Bewusstsein von der Realität entfernt hat bzw. wie weit der Mensch psychophysisch in die VR eingebunden ist. Dabei wird hier von sogenannten immersiven VR-Umgebungen gesprochen. In immersiven VR-Umgebungen „taucht“ der Benutzer in die digitale Welt ein und wird zu einem Element der VR-Umgebung. In Abhängigkeit des Visualisierungssystems und der Interaktionsmöglichkeiten nimmt der Benutzer seine reale Umgebung nicht mehr oder nur noch teilweise visuell und auditiv wahr, der Immersionsgrad steigt. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Nutzung eines Datensichthelms (Head Mounted Display) und Datenhandschuhs zum Erleben virtueller Welten. Non-immersive VR-Systeme basieren auf den gleichen oder ähnlichen Daten, werden dem Benutzer aber über traditionelle Systeme (z.B. Monitor) präsentiert, so dass eine weniger intuitive Interaktivität wie in immersiven VR-Umgebungen vorhanden ist. Non-immersive Systeme werden in dieser Arbeit ausgeklammert, da sie für eine realitätsnahe, menschantegrierte Simulation nicht die notwendigen Voraussetzungen bieten. Im Gegensatz zu den bisher bekannten, meist bildschirmbasierten, zweidimensionalen Darstellungsmedien steht somit bei der Virtuellen Realität verstärkt der Mensch im Mittelpunkt. Wie realistisch die virtuelle Realität empfunden wird, hängt dennoch im Wesentlichen von der menschlichen Vorstellungskraft, der Imagination, ab. Das dritte I neben Interaktion und Immersion ist somit wesentlicher Faktor für die Virtuelle Realität und ist stark abhängig von den anderen I's.

Als Virtual Reality wird im Folgenden ein Möglichkeit für Menschen verstanden, mittels einer speziellen VR-Schnittstelle in einer Echtzeit-3D-Umgebung komplexe Daten bzw. Modelle zu visualisieren sowie mit den Modellen zu interagieren und sie zu manipulieren, wobei es gilt, ein höchstmögliches Maß an Immersion durch eine entsprechende Stimulation der Sinne zu erreichen.

Unter dem Begriff VR-Schnittstelle soll im Folgenden eine Mensch-Maschine-Schnittstelle verstanden werden, mit deren Hilfe der Mensch in die Lage versetzt wird, direkt mit den in einem Computersystem existierenden virtuellen Objekten zu interagieren. Virtuelle Objekte beschreiben dabei Datenstrukturen, die in einer virtuellen Umgebung existieren und diese durch ihre Existenz definieren. Die Menge aller virtuellen Objekte in einem Datenraum kann als virtuelle Umgebung bezeichnet werden.

4.2 Abgrenzung zu verwandten Technologien

Die Verwandtschaft der Virtual Reality zu anderen Technologien erfordert eine Abgrenzung der Begriffe. Im Wesentlichen sind dies die Augmented Reality (AR) oder zu Deutsch Erweiterte Realität sowie die Telepräsenz, die manchmal ebenfalls mit VR in Verbindung gebracht wird. Hierzu findet das Reality-Virtuality Continuum Anwendung (siehe Abbildung 4-3) [MIL-99].

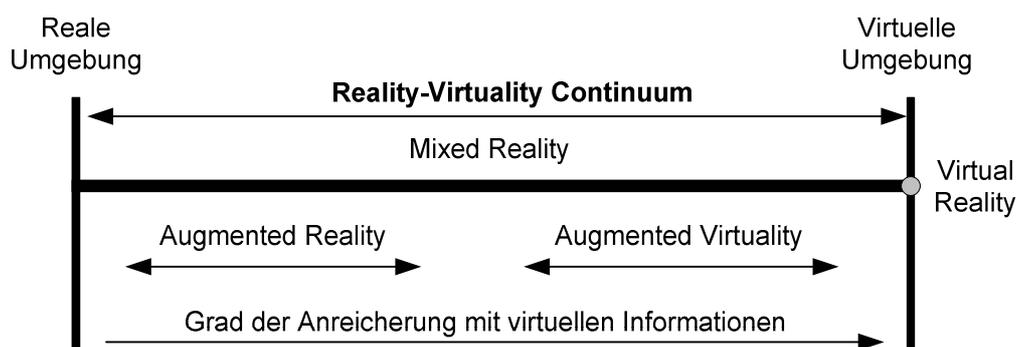


Abbildung 4-3: Reality-Virtuality Continuum

Der Grad der Anreicherung der menschlichen Wahrnehmung mit rechnergenerierten Informationen bestimmt die Anwendung der Begrifflichkeiten des Reality-Virtuality Continuum. Es wird hierbei zwischen der Virtuellen Umgebung (Virtual Reality), der vollständig rechnergenerierten Abbildung und der realen Umgebung (Reality) des Menschen unterschieden. Der Bereich zwischen diesen beiden Extrempositionen

wird als „Misch-Realität“ (Mixed Reality) bezeichnet. Dieser Zwischenbereich ist in die Bereiche AR und Erweiterte Virtualität (Augmented Virtuality) geteilt.

Der Begriff Augmented Reality beschreibt die Ergänzung der visuellen Wahrnehmung des Menschen durch die situationsgerechte Anzeige von rechnergenerierten Informationen auf im Sichtfeld positionierten tragbaren Geräten [ALT-02]. Zielsetzung der Technologie ist es, eine dreidimensional wirksame Kombination realer und virtueller Informationen in Echtzeit zu schaffen, um den Menschen in informatorischer Hinsicht zu unterstützen. Anwendungsbereiche gibt es beispielsweise in der Medizintechnik zur Unterstützung bei der Durchführung von Operationen oder in der Produktion zur Informationsunterstützung des Werkers mit spezifischen Montageanweisungen. Dadurch soll die Flexibilität des Menschen mit den schnellen Berechnungsprozessen von Rechenanlagen kombiniert werden, um so die Leistungsfähigkeit des Nutzers zu steigern.

Während bei der Augmented Reality der Schwerpunkt auf der Wahrnehmung der Realität liegt, liegt er bei der Augmented Virtuality entsprechend auf der Wahrnehmung der Virtualität. Am Ende des Kontinuums steht die Virtual Reality und beschreibt eine vollkommen vom Rechner generierte Welt, wobei keinerlei reale Informationen mit einbezogen werden. Somit stützt sich die VR-Technologie rein auf virtuelle Informationen.

Virtual Reality wird manchmal auch in Zusammenhang mit Telepräsenz Anwendungen erwähnt, die mit VR-Komponenten wie Datenhelm und Datenhandschuh gekoppelt sind. Hierbei werden nicht ausschließlich computergenerierte Bilder betrachtet, sondern hauptsächlich Videoaufnahmen von weit entfernt liegenden Orten, beispielsweise in verseuchtem Gelände. Diese Daten werden der interagierenden Person im Datenhelm eingeblendet, so dass sie mehr oder weniger den Eindruck bekommt, sie befände sich direkt in der dargestellten Umgebung. Anwendung findet diese Technik beispielsweise bei der Bedienung von Robotern in Weltraummissionen. Meist kommen derartige Einsätze vollkommen ohne virtuelle Informationen aus und differenzieren sich dementsprechend von der VR.

4.3 Funktionsweise und Aufbau von Virtual Reality Systemen

Im folgenden Abschnitt werden die Funktionsweise und der Aufbau von Virtual Reality Systemen erläutert. Es gibt verschiedenste Systemvarianten, deren Aufbau sich durch die eingesetzte Hard- und Software unterscheidet. Wie ein derartiges System aufgebaut ist, hängt im Wesentlichen von der Anwendung ab. Einen grundlegenden einheitlichen Aufbau weisen jedoch alle VR-Systeme auf. Es handelt sich um eine Simulationsschleife, in die der Mensch als Benutzer integriert ist.

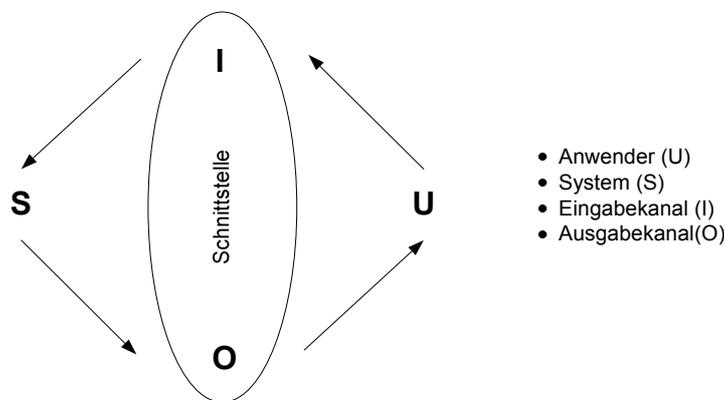


Abbildung 4-4: Interaktives System

Zur prinzipiellen Darstellung eines Virtual Reality Systems kann das Interaktionsmodell nach Abowd und Beale (siehe Abbildung 4-4) herangezogen werden, die ein interaktives System in vier Hauptkomponenten unterteilen [SYM-00]. Die einzelnen Komponenten eines VR-Systems können den vier Hauptkomponenten zugeordnet werden (siehe Abbildung 4-5).

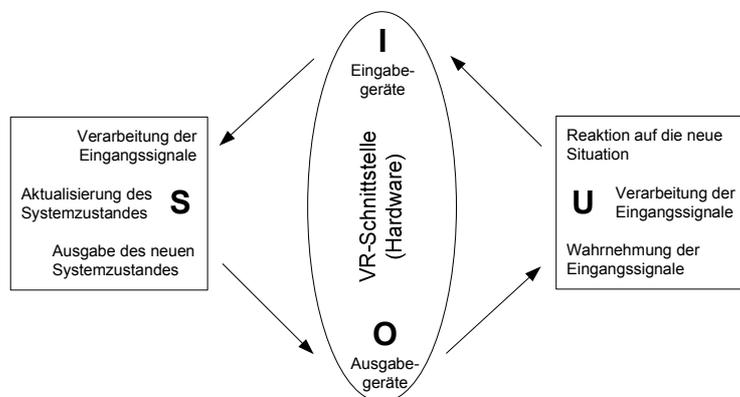


Abbildung 4-5: VR-System nach dem Interaktionsmodell

Der Mensch gibt über entsprechende Eingabegeräte (I) Informationen in das System ein, die anschließend vom Rechnersystem (S) verarbeitet und über Ausgabegeräte (O) wieder dem Nutzer (U) zugeführt werden. Der Mensch (U) nimmt die ausgegebenen Informationen (O) wahr und reagiert mit neuen Eingaben (I) in das System (S). Dabei entsteht eine Art Regelkreis, in den der Mensch integriert ist. Vom grundsätzlichen unterscheidet sich dies nicht von herkömmlichen interaktiven Systemen (z.B. Computeranwendungen). Der Unterschied liegt hauptsächlich in den Ein- und Ausgabemetaphern eines VR-Systems. Dem Anwender soll die Möglichkeit gegeben werden, sich in einer computergenerierten Umgebung so zu verhalten und mit den virtuellen Objekten so zu interagieren, wie er es auch aus seiner realen Welt gewohnt ist. Daraus ergibt sich zwingend die Forderung nach der Echtzeitfähigkeit eines VR-Systems. Bei der Echtzeitanforderung handelt es sich um ein Attribut, das bei allen VR-Systemen gegeben sein muss und durch die sich diese Systeme von den restlichen interaktiven Systemen unterscheiden. Die Integration des Anwenders in ein VR-System mit der Möglichkeit der freien Bewegung in dieser künstlichen Welt, setzt zudem voraus, dass Bewegungen (z.B. des Kopfes oder der Hand) vom System registriert und in einem sofortigen Aktualisierungszyklus verarbeitet werden.

Eine vollständige, realistische Interaktion in einer virtuellen Umgebung stellt bis heute den Idealfall dar und ist mit aktueller Technik nicht erreichbar. Aus diesem Grund wird mit den vorhandenen Techniken versucht, sich auf einen Teil der realen Welt zu beschränken, der in einem VR-System nachgebildet wird.

Für die Realisierung kommen verschiedenste Techniken zur Anwendung, die die Schnittstelle zwischen technischen System und Menschen vollkommen neu gestalten. VR-Systeme bestehen typischerweise aus folgenden Komponenten:

- Ausgabesystem
- Eingabesystem
- Hard- und Software
- Geometriemodell

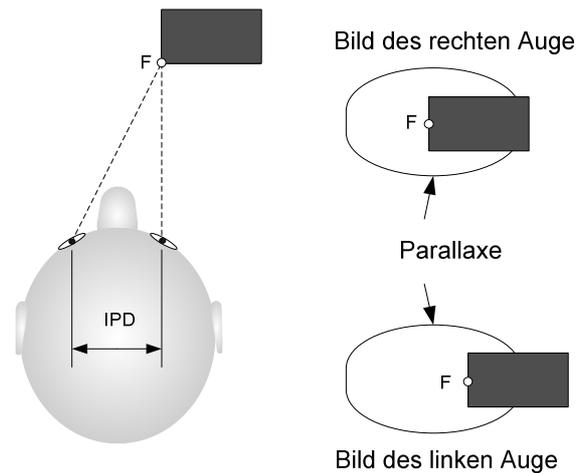
Nachfolgend werden diese Systeme und deren Integration in ein VR-System näher betrachtet.

4.3.1 Das Ausgabesystem

Die Funktionsweise der Virtuellen Realität beruht im Wesentlichen darauf, dass ein VR-System die menschlichen Sinne über die VR-Schnittstelle in einer Art und Weise stimuliert, so dass ein höchstmöglicher Grad an Immersion erreicht wird. Hierzu müssen insbesondere der Sehsinn, Hörsinn und Tastsinn in entsprechender Weise durch Ausgabesysteme der Mensch-Maschine-Schnittstelle angeregt werden. Die chemischen Sinne des Menschen, der Geruchs- und Geschmackssinn, spielen in der VR-Schnittstelle bis dato noch keine Rolle, und es scheint zweifelhaft, ob sich dies in Zukunft ändern wird. Dies liegt daran, dass die Geruchs- und Geschmackswahrnehmung noch nicht vollständig verstanden wird und in besonderer Weise von subjektiven Faktoren abhängig ist. Sie haben prinzipiell in der Virtuellen Realität auch keinen großen Stellenwert, weshalb sie im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ausgabesysteme im Kontext der Sinneswahrnehmung behandelt. Dies umfasst Geräte zur Bildausgabe, das Audioausgabesystem und teilweise kraftvermittelnde Geräte.

4.3.1.1 Das visuelle System

Eine perfekte Illusion für den Menschen wird nur dann erreicht, wenn seine Sinnesorgane durch ein VR-System so perfekt stimuliert werden, dass er den Unterschied zwischen der Realität und der virtuellen Welt nicht wahrnimmt. Dazu muss das leistungsfähigste Wahrnehmungsorgan des Menschen, das Auge, entsprechend angeregt werden. Allein 70 % der Sinneswahrnehmung basieren auf diesem wichtigen Organ [KLE-88]. Mit Hilfe der Augen nimmt der Mensch seine Umgebung räumlich, also mit Tiefenwirkung, wahr. Dafür ist im Wesentlichen das binokulare Sehen (beidäugiges Sehen) verantwortlich [WIK-08a]. Die Tatsache, dass jedes Auge ein um den Augenabstand verschobenes Bild wahrnimmt, verhilft zum räumlichen Sehen (siehe Abbildung 4-6). Beide Bilder werden im Gehirn gleichzeitig verarbeitet, und durch Erfahrung ist der Mensch in der Lage, daraus Schlüsse auf Entfernung und Anordnung von Gegenständen im Raum zu ziehen [BOR-94].



IPD...inter-pupillary distance (Augenabstand)

Abbildung 4-6: Physiologisches Modell des binokularen Sehens [BOR-94]

Die Verschiebung der beiden Bilder wird Bild-Parallaxe genannt und muss von der VR reproduziert werden, damit ein stereoskopisches Sehen möglich wird. Dementsprechend müssen zwei um den Augenabstand versetzte Bilder von der VR-Schnittstelle generiert und über ein passendes Hilfsmittel dem jeweiligen Auge zugeführt werden.

Über einen Datenhelm beispielsweise können die Bilder dem entsprechenden Auge direkt über kleine LCD-Screens zugeführt werden. Auf Monitoren oder Projektionseinheiten werden diese Bilder auf einer Fläche dargestellt, so dass sie für jedes einzelne Auge wieder voneinander getrennt werden müssen. Für diese Trennung stehen zwei grundlegende Verfahrensweisen, das zeitmultiplexe und das zeitparallele, zur Verfügung.

Bei den zeitparallelen Verfahren werden die Ansichten für das linke und rechte Auge zeitgleich vermittelt. Spezielle Mechanismen müssen dabei sicherstellen, dass jedes Auge das perspektivisch richtige Bild empfängt. Bei der häufig angewandten Polarisationsfiltertechnik, die auch als passives Verfahren bezeichnet werden kann, wird mit Hilfe von polarisiertem Licht und einfachen Polarisationsbrillen der entsprechende Bildkanal dem jeweiligen Auge zugeführt (siehe Abbildung 4-7). Dieses Verfahren ist verhältnismäßig kostengünstig und einfach in der Umsetzung.

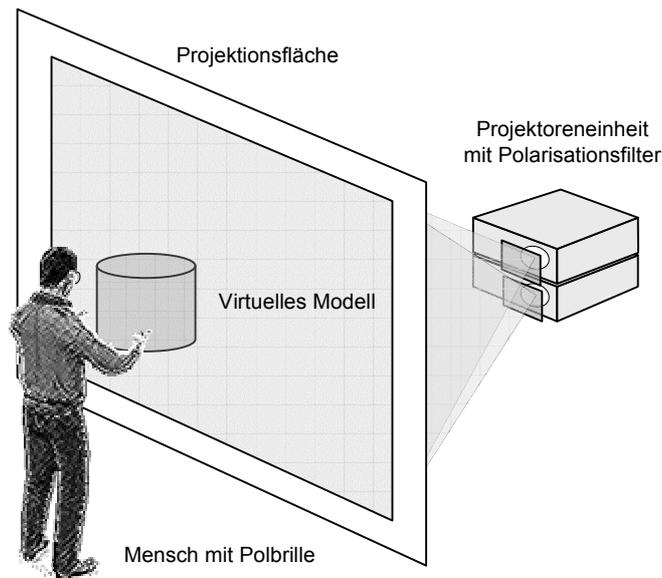


Abbildung 4-7: Projektionssystem mit passiven Verfahren

Zeitmultiplexe Verfahren hingegen präsentieren die Bilder zeitlich versetzt. Alle Bilder werden alternierend auf einem Ausgabegerät (z.B. Projektionsfläche) ausgegeben. Eine verschlussgesteuerte Brille sorgt dafür, dass abwechselnd immer nur ein Auge das Bild wahrnehmen kann. Durch Synchronisation zwischen Ausgabeeinheit und Brille wird sichergestellt, dass die Augen jeweils das richtige Bild empfangen. Bei diesem auch als aktiv bezeichneten Verfahren kommen beispielsweise Brillen zum Einsatz, die mittels LCD-Technik durch Verdunkelung abwechselnd einen Bildkanal ausblenden können. Um eine fließende Bewegung der Bilder zu erreichen, sind Bildraten von mehr als 25 Bildern pro Sekunde notwendig. Aktive Systeme sind aus diesem Grund sehr teuer, da dementsprechend hochwertige Projektionseinheiten von Nöten sind ([BOR-94], [BUR-94]).

Bei den Bildausgabegeräten kann zwischen zwei grundlegenden Arten, den Projektionssystemen und den Datenhelmen, unterschieden werden. Die Projektionssysteme werden in Einseiten- und Mehrseitensysteme unterteilt. Die Systeme zeichnen sich durch eine hohe Bildqualität (Auflösung etc.) aus. Je nach Größe des Systems kann ein relativ großes Sichtfeld generiert werden. Bei Mehrseitensystemen kann der Anwender zudem in verschiedenen Richtungen blicken. Bei sogenannten CAVE-Systemen (Cave Virtual Automatic Environment) beispielsweise befindet sich der Anwender in einem Projektionsraum mit bis zu sechs Wänden (siehe Abbildung 4-8). Der Nachteil von Projektionssystemen liegt in der meist festen Installation.

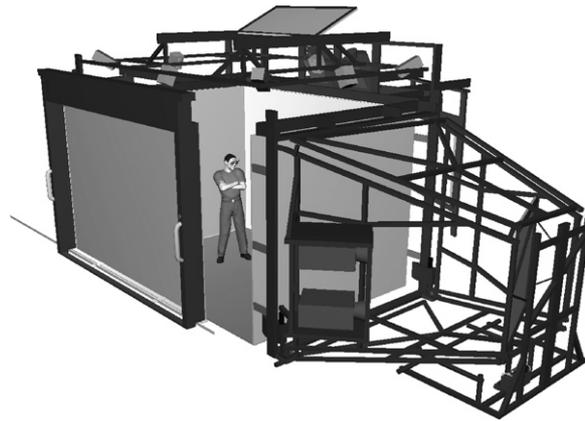


Abbildung 4-8: CAVE [JVR-08]

Bei den Datenhelmen, auch HMD (Head Mounted Display) genannt, die auf dem Kopf des Anwenders positioniert werden, handelt es sich um die bekanntesten im Zusammenhang mit Virtual Reality eingesetzten visuellen Anzeigesysteme. Neben monokularen und biokularen HMDs wird sehr häufig der binokulare Datenhelm (siehe Abbildung 4-9) eingesetzt. Beim binokularen HMD werden beispielsweise über zwei kleine LCD-Displays, die sich im HMD direkt vor den linken und rechten Augen befinden, zwei voneinander getrennte Bilder für eine stereoskopische Darstellung eingeblendet.

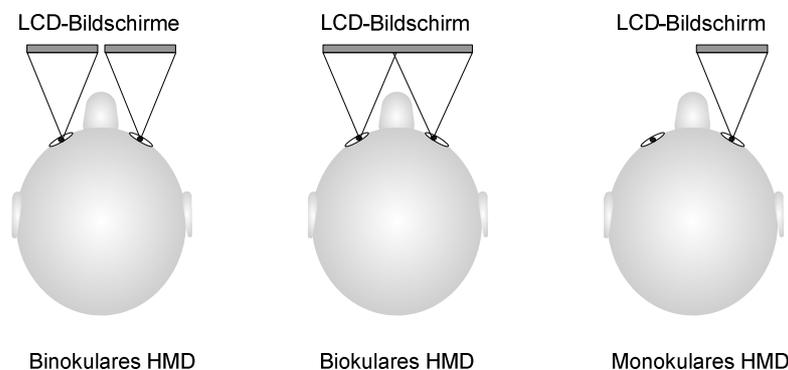


Abbildung 4-9: Bauformen von HMDs [ALT-02]

Der Nachteil der HMDs liegt in ihrem Tragegewicht und dem kleinen Sichtfeld, das sie zur Verfügung stellen. Hinzu kommt, dass qualitativ hochwertige HMDs unverhältnismäßig teuer sind. Für die Nutzung eines Datenhelms in einem VR-System ist das schnelle und exakte Positionstracking unerlässlich, über das der Rechner die jeweils aktuelle Position und Orientierung des Helms im Raum erhält. Diese Positionsdaten bilden die Grundlage für die Berechnung der im Datenhelm angezeigten Bilder.

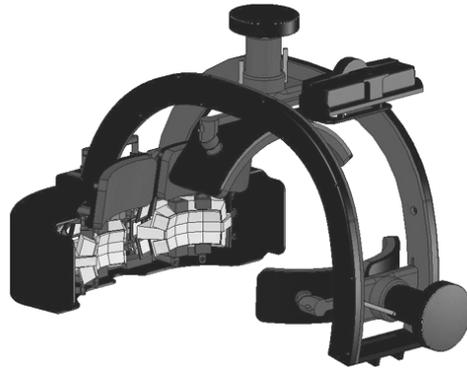


Abbildung 4-10: Sensics HMD [MIC-08]

Für die visuelle Darstellung dreidimensionaler Daten sind die computergenerierten Bilder von großer Bedeutung. In einem sogenannten Renderingprozess basierend auf Polygonmodellen müssen in Echtzeit die Bilder jeweils für das linke bzw. rechte Auge perspektivisch korrekt berechnet werden. Im Abschnitt Software und Rechner-system wird diese wichtige Komponente eingehender behandelt.

4.3.1.2 Das haptische System

Als haptische Wahrnehmung bezeichnet man das aktive Erfühlen von Größe, Konturen, Oberflächentextur, Gewicht usw. eines Objektes durch Integration aller Hautsinne und der Tiefensensibilität [WIK-08b]. Haptische Wahrnehmung bezieht sich auf den Kontakt des Menschen mit seiner Umwelt durch "Berührung" mit den Händen. Hierbei sind zwei Mechanismen zu unterscheiden:

- Taktile Reize
- Kinästhetische Reize

Die taktilen Reize werden durch Rezeptoren in der Haut empfangen und weitergeleitet. Hierdurch werden Temperatur, Druck, Vibration und Schmerz vermittelt. Durch kinästhetische Reize werden Informationen über den eigenen Körper bereitgestellt. Über sogenannte kinästhetische Sensoren, die in Muskeln und Gelenken liegen, ist für den Menschen möglich, die Lage, Bewegung und Drehung einzelner Körperpartien und der auf sie einwirkenden Kräfte zu ermitteln [WIK-08b].

Für die Stimulation dieser Reize müssen passende Ausgabegeräte eingesetzt werden. Dabei beschränkt man sich heute meist auf die haptische Rückkopplung bei Greifaktionen. Haptische Geräte sollen Informationen so darbieten, dass ein Benutzer eine Umgebung empfinden und manipulieren kann. Diese Ausgabegeräte kön-

nen entsprechend taktile Ausgabegeräte und kinästhetische Ausgabegeräte genannt werden. Taktile Geräte vermitteln der Haut Berührungsempfindungen z.B. mittels Vibrationen, die über Formgedächtnis-Aktoren erzeugt werden. Über Luftpölsterchen, die am Datenhandschuh angebracht sind, sind beispielsweise auch Druckempfindungen vermittelbar. Kinästhetische Geräte beziehen sich auf die Muskelspannungen und Gelenkwinkel, wodurch hierbei Kräfte und deren Richtung beschrieben werden. Diese finden Verwendung, um die Bewegung einzelner Körperteile (z.B. Arm) mittels mechanischer Hilfsmittel zu beeinflussen (siehe Abbildung 4-11). Die Kinesthätik kann beispielsweise dazu verwendet werden, um einen physikalischen Widerstand – zum Beispiel eine Wand – in der virtuellen Welt zu vermitteln [BOR-94].



Abbildung 4-11: Sensable Phantom Omni [INI-08]

4.3.1.3 Das auditive System

Das Gehör ist der dritt wichtigste Sinn des Menschen [BOR-94]. Über den Audiokanal können dem Anwender zusätzlich zu den generierten Bildern Toninformationen vermittelt werden. Mögliche Anwendungsfelder erstrecken sich von einfachen Statusinformationen, beispielsweise eine akustische Bestätigung für den eingegebenen Befehl, bis hin zur Simulation von dreidimensionalen Geräuschquellen in einer virtuellen Umgebung. Zur Erhöhung der Realistik in einer virtuellen Umgebung muss dieser Sinn mittels Lautsprechersystemen und entsprechenden Wiedergabemodellen (Dolby Surround etc.) bedient werden.

4.3.2 Das Eingabesystem

Die Integration des Anwenders in eine virtuelle Umgebung zur möglichst natürlichen Interaktion mit den virtuellen Objekten setzt spezielle Eingabesysteme voraus, die die Aktionen des Anwenders erfassen und dem technischen System für die Weiterverarbeitung zur Verfügung stellen. Im Folgenden werden die hierfür zur Verfügung stehenden Geräteklassen diskutiert, wobei auf Grund der Vielfältigkeit technologisch unrelevante Systeme vernachlässigt werden. Es soll jedoch ein Überblick über die aktuellsten technischen Möglichkeiten gegeben werden.

4.3.2.1 Positionserfassungssystem

Von besonderer Bedeutung für die immersiven und dreidimensionalen VR-Systeme sind die Positionssensoren, die auch als Trackingsystem bezeichnet werden. Die Trackingsysteme sind an Datenhandschuh, -anzug und/oder 3D-Brille (z.B. Polarisationsfilterbrille) angebracht und gewährleisten die Bestimmung der Position und Orientierung des Trägers im Raum. An Hand der Positionsinformationen kann das Computersystem die aktuelle Lage des Benutzers innerhalb des Computermodells bestimmen und die notwendigen Berechnungen für das virtuelle Modell vornehmen. Hierfür stehen die verschiedensten Gerätschaften zur Verfügung. Es wird zwischen optischen, magnetischen, mechanischen, inertialen und akustischen Trackern unterschieden. Optische Trackingsysteme (siehe Abbildung 4-12) sind heute am weitesten verbreitet, da sie die qualitativ besten Ergebnisse liefern. Auf die eingehende Behandlung der übrigen Verfahren wird daher verzichtet. Sie finden ohnedies nur noch wenig Anwendung im Rahmen der Virtual Reality.



Abbildung 4-12: A.R.T. optisches Trackingsystem [ART-08]

Optische Trackingverfahren basieren auf Bildverarbeitungsalgorithmen. Dazu werden aus verschiedenen bekannten Positionen im Raum Bilder aufgenommen und digital weiterverarbeitet. Aus den einzelnen 2D-Bild-Koordinaten festgelegter Messmarken können die 3D-Positionskoordinaten berechnet werden. Für die Ermittlung der Orientierung im Raum müssen mehrere bekannte Messmarken auf den Bildern identifiziert und zugeordnet werden können ([SYM-00], [ART-07]). Abhängig von der Auflösung und der Anzahl der eingesetzten Kameras wie auch von der Größe des aufgenommenen Raumes variieren die Genauigkeiten dieser Systeme. Die erzielten Ergebnisse sind aber besser als bei den restlichen Verfahren.

4.3.2.2 Bewegungsplattformen (Locomotion Devices)

Eine besonders wichtige Möglichkeit der Interaktion ist die Fortbewegung in virtuellen Umgebungen. In herkömmlichen VR-Systemen navigiert der Anwender meistens durch bestimmte Funktionen eines Eingabegerätes, das mit der Hand bedient wird. Um eine intuitivere Navigation im virtuellen Raum zu ermöglichen, wurden in den letzten Jahren viele Anstrengungen unternommen Interaktionsgeräte zu entwickeln, die eine realitätsnahe Bewegung in der Virtuellen Realität zulassen. Diese Geräte sind zum großen Teil noch Gegenstand der Forschung, lassen aber erkennen, dass es mittels geeigneter Mechanismen machbar ist, dem Menschen das Gehen in der VR zu ermöglichen. Dazu ist notwendig, sich virtuell in ein, zwei oder sogar drei Dimensionen zu bewegen, wobei dies zu dem Problem führt, dass eine Person, die sich in der virtuellen Welt bewegt, auf Grund der Unbeweglichkeit eines VR-Systems an einen begrenzten Raum gebunden ist. Deshalb wird hier nach dem Prinzip der Negation verfahren, bei dem eine Umkehr der eigentlichen Bewegungsrichtung erfolgt. Der Anwender tritt auf einer Plattform auf der Stelle, während sich der Untergrund mit gegensätzlicher Geschwindigkeit in ein oder mehrere Richtungen bewegt. Hierzu wird weltweit in unterschiedlichen Forschungseinrichtungen an verschiedenen Konzepten geforscht.

Ein Konzept sieht dabei die Bewegung in einer großen Kugel vor, die leicht und auf Rollen gelagert ist. Der Anwender selbst treibt durch seine eigene Kraft die Kugel an und beschleunigt, wobei die visuellen Daten über ein kabelloses HMD an den Menschen vermittelt werden (siehe Abbildung 4-13) [VIR-08].



Abbildung 4-13: VirtuSphere [VIR-08]

Zur Bewegung in der Ebene kann auch eine Kombination aus Gurten verwendet werden. Ein großer Gurt zur Vorwärtsbewegung trägt dabei eine Reihe von kleinen Gurten, die eine Seitwärtsbewegung gestatten (siehe Abbildung 4-14). Durch gezielte Ansteuerung der Gurtsegmente ist auf diese Weise eine Bewegung in alle Richtungen der Ebene möglich ([BOW-05], [LAM-08]).

Neben diesen vielversprechenden Ansätzen auf dem Forschungsgebiet der Locomotion Devices gibt es zahlreiche weitere Konzepte, die auf Grund ihrer geringen Bedeutung an dieser Stelle nicht erläutert werden. Zur weiteren Vertiefung des Themas sei daher auf das Buch 3D User Interfaces von Doug A. Bowman [BOW-05] als weiterführende Lektüre verwiesen.

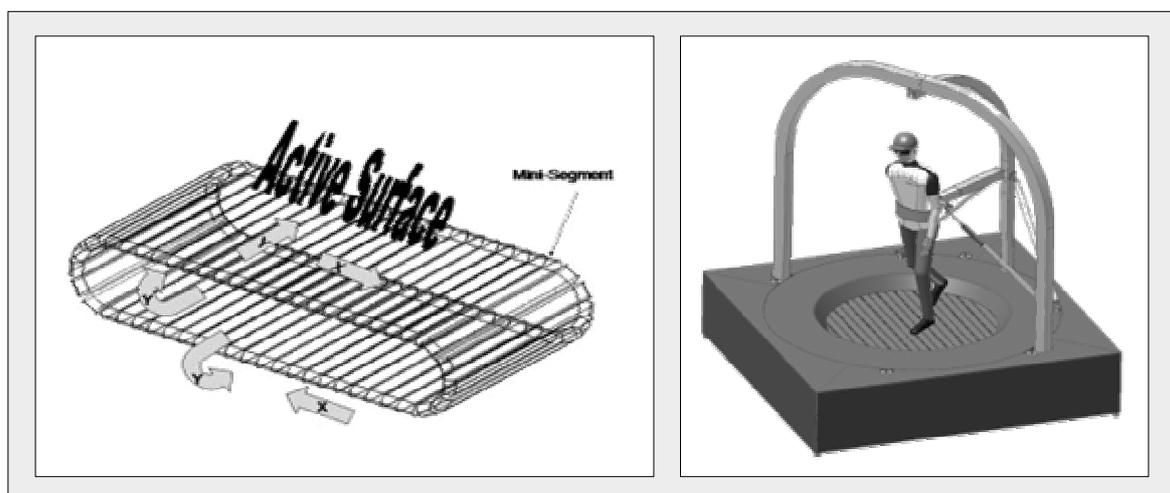


Abbildung 4-14: Bewegung auf einer Ebene [VSD-08]

4.3.2.3 Datenhandschuhe

Die Interaktion mit den Objekten der dreidimensionalen Umgebung ist eine wesentliche Charakteristik der Virtuellen Realität. Überwiegend kommen hierzu Datenhandschuhe zum Einsatz, die wirklichkeitsnahe Manipulationsvorgänge erlauben. Hauptaufgabe eines Datenhandschuhs ist dabei die Erfassung der menschlichen Bewegungen (z.B. der Finger), damit diese dem VR-System für weiterführende Informationsverarbeitungsprozesse in geeigneter Form als Input zur Verfügung gestellt werden können, beispielsweise zur gestenbasierten Steuerung.

Für die Bewegungserfassung der Hand und der einzelnen Finger stehen Datenhandschuhe (siehe Abbildung 4-15) zur Verfügung, die mit geeigneter Sensorik zur Positions- bzw. Orientierungsmessung ausgestattet sind [SYM-00]. Zur Bestimmung der Handposition im Raum kann ein optisches Trackingverfahren (siehe Abschnitt 2.3.2.1) mit entsprechenden Markern, die auf dem Handschuh anzubringen sind, eingesetzt werden. Über die Winkelmessung der einzelnen Gelenke wird die Stellung der Finger ermittelt. Dabei wird über Dehnmessstreifen auf die Krümmung der Gelenke geschlossen. Es handelt sich bei der Messung nicht um absolute Winkelmaße, sondern um eine lineare Abbildung zwischen Krümmung und einem Wertebereich, der vom VR-System während der Benutzung ausgewertet wird.



Abbildung 4-15: Datenhandschuh [5DT-08]

Die Messergebnisse des Datenhandschuhs werden anschließend für die Gestenerkennung zur Steuerung des dreidimensionalen Geometriemodells eingesetzt. Daneben existieren Datenhandschuhe, die zusätzlich zu den Sensoren zur Eingabefassung auch über Aktoren verfügen, die das taktile Feedback (Rückführung der ermittelten Kontaktkräfte) und das Force Feedback (Krafterückkopplung) aus der VR ermöglichen (siehe Abbildung 4-16). Dadurch wird eine noch realistischere Interakti-

on möglich, da dem Nutzer das Gefühl vermittelt wird, tatsächlich ein Objekt mit seinen physikalischen Eigenschaften zu erfahren. Hierzu werden spezielle Verfahren, die eine realistische Objektmanipulation mit Haptik und entsprechender Körperphysik ermöglichen, entwickelt und erprobt ([ZÄH-04a], [ZÄH-04b]). In angeführten Artikeln von Zäh finden sich Quellenangaben zu weiterführender Lektüre zum Thema Interaktion und Datenhandschuhe.



Abbildung 4-16: Datenhandschuh CyberGrasp mit Force Feedback [RSI-08]

Der Datenhandschuh ist zur wirklichkeitsgetreuen Manipulation virtueller Objekte ein wichtiger Bestandteil der VR und nimmt deshalb eine wichtige Rolle in dieser Arbeit ein.

4.3.2.4 Spracheingabe

Ein weiterhin wichtiges Eingabemedium ist die Sprachsteuerung. Für die Eingabe verschiedener Befehle ist die Spracheingabe sehr hilfreich und relativ problemlos realisierbar. Mit Hilfe einer derartigen Befehlseingabe können Knöpfe und Tasten anderer Eingabegeräte ersetzt werden. In einer virtuellen Umgebung kann es sehr störend sein, dreidimensionale Menüs zu bedienen. Auch bietet die Tastatur keine sinnvolle Alternative. Erfahrungen zeigen, dass die unterschiedlichen Funktionsbelegungen der Knöpfe an einem Interaktionsgerät zur Konfusion des Anwenders führen. Es sind verschiedenste Spracheingabesysteme auf dem Markt erhältlich, wobei zwischen sprecherunabhängigen und -abhängigen Systemen unterschieden wird [SYM-00].

4.3.2.5 Weitere Eingabegeräte

Mit Ausnahme der Spracheingabe handelt es sich bei den betrachteten Eingabegeräten um Systeme, die die Bewegung und Aktion des Anwenders direkt erfassen, auswerten und entsprechend dieser Daten die virtuelle Repräsentation des Anwenders steuern. Zusätzlich zu diesen Eingabegeräten gibt es Geräte, die für die Navigation durch eine virtuelle Szene eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind die Spacemouse oder Flystick (siehe Abbildung 4-17) [ICI-08]. Über diese Geräte kann die Bewegung eines virtuellen Objektes in allen sechs Freiheitsgraden gesteuert werden. Darüber hinaus kommen auch Geräte zum Einsatz, mit deren Hilfe bestimmte Ereignisse ausgelöst werden können. Dazu zählen Schalter und Knöpfe an den erwähnten Navigationsinstrumenten genauso wie auch die Tastatur des Computers.



Abbildung 4-17: Flystick [IMS-08]

4.3.3 Hard- und Softwarearchitektur für die Virtuelle Realität

Der Kern jedes VR-Systems stellt das Rechnersystem, hier auch als Hardware bezeichnet, mit der darauf betriebenen Software dar. Dieses System verarbeitet nicht nur die Daten der Eingabegeräte und steuert dementsprechend die Ausgabesysteme an der VR-Schnittstelle in einem Regelkreis zwischen Mensch und Maschine, sondern hat auch das Simulationsmodell der virtuellen Umgebung gespeichert (siehe Abbildung 4-18).

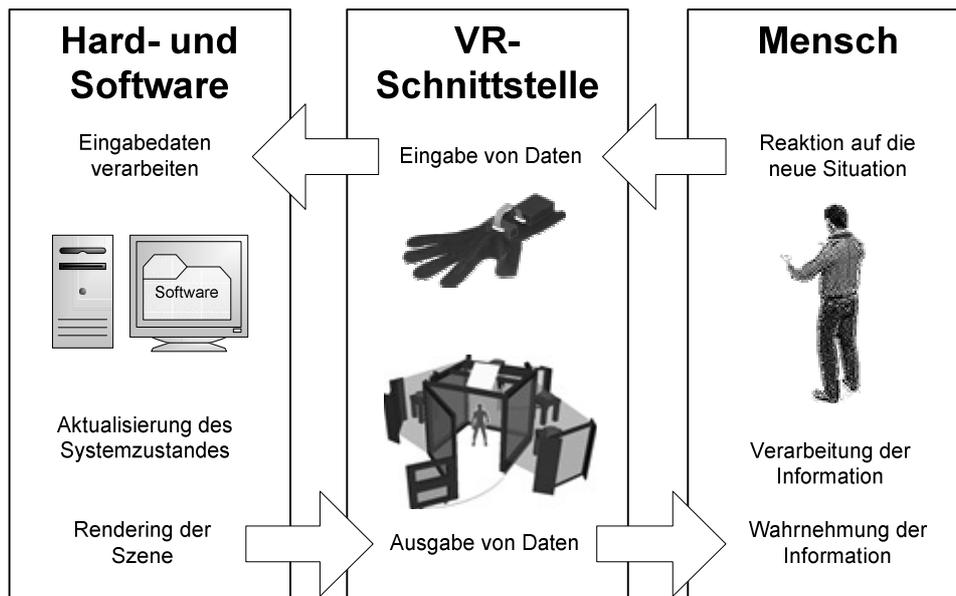


Abbildung 4-18: VR-System-Schema mit Hard- und Software

Die Tatsache, dass verschiedenste Peripheriegeräte (Eingabe- und Ausgabesysteme) an die Hardware angeschlossen sind und große Datenmengen in das System einlasten bzw. auch wieder vom System zurückbekommen verdeutlicht, dass insbesondere Timingprobleme (Synchronisationsprobleme) zwischen den einzelnen Komponenten auftreten können. Die großen Datenmengen, die es zu verarbeiten gilt, stellen bezüglich der Leistungsfähigkeit zusätzlich hohe Anforderungen an die Hardware. Um eine fließende Bewegung der Bilder, die über das visuelle Ausgabesystem vermittelt werden, zu erreichen, sind Framerates (Bildraten) von mindestens 25 fps (Frames per second oder Bilder pro Sekunde) notwendig. Damit stehen für die Berechnung eines Bildes maximal 40ms zur Verfügung, um die Forderung nach Echtzeitfähigkeit zu erfüllen. Zudem ist zu beachten, dass innerhalb dieses 40ms Zeitfensters alle Eingangssignale in die Berechnung miteinbezogen werden müssen. Bei Verzögerungen von mehr als 1/6 Sekunde zwischen Eingangssignal (z.B. durch Positionstracking) und Ausgabesignal wird die Illusion der Immersion zerstört [BOR-94]. Grundlage der Bilddarstellung ist der Renderingprozess, der basierend auf Polygonmodellen die dreidimensionalen Daten zur Ausgabe berechnet. Um die Echtzeitanforderung zu erfüllen, werden Hochleistungsrechner hierfür eingesetzt. Insbesondere wichtig sind die in den Rechnern zur Verwendung kommenden Grafiksysteme, die mehrere Millionen Polygone pro Sekunde berechnen müssen. Heutige Computersysteme bieten dafür bereits eine enorme Rechenleistung an. Während vor wenigen Jahren noch auf spezielle Rechnersysteme zurückgegriffen werden musste, genügen

heute PC-basierte High-End-Workstations mit entsprechenden High-End-Grafiksystemen. Aktuelle PC-Grafiksysteme können mehrere hundert Millionen Polygone pro Sekunde berechnen und ausgeben. Auch wenn sich die Leistung dieser Systeme jährlich steigert, wird der Gewinn an Leistungskapazität sofort durch immer anspruchsvollere Anwendungen aufgesogen. Dennoch sind damit sehr realistische VR-Modelle darstellbar.

Damit die immense Informationsflut der Eingabesysteme und die daraufhin erfolgenden Berechnungsoperationen schnellstmöglich erfolgen können, bedient man sich heute des sogenannten Clustercomputing. Ein Computercluster, meist einfach Cluster genannt, bezeichnet eine Anzahl von vernetzten Computern, die von außen in vielen Fällen als ein Computer gesehen werden können. Ziel des "Clustering" besteht meistens in der Erhöhung der Rechenkapazität oder der Verfügbarkeit gegenüber einem einzelnen Computer [WIK-08c]. In einem Virtual Reality System können so die Aufgaben innerhalb eines PC-Clusters verteilt werden. Dabei übernehmen in der Regel jeweils ein Hochleistungs-PC mit Multicore-Prozessor und entsprechender Hochleistungsgrafikkarte die Berechnung der Bilder für jeweils ein Auge. D.h. für ein Projektionssystem mit einer Projektionsfläche kommen zwei Rechner zur Berechnung der Bilder zum Einsatz. Zusätzlich finden Rechner für die Vorverarbeitung der Daten der Eingabesysteme (z.B. Tracking) Verwendung. Zur Steuerung des Gesamtsystems steht über alle dem ein Steuerrechner (Master), der die Aufgaben verteilt und den Cluster untereinander synchronisiert. Die Synchronisierung ist äußerst wichtig, da durch sie sichergestellt wird, dass Arbeitsschritte synchron beendet werden und eine synchrone Ausgabe der zwei getrennten Bilder an der Ausgabeeinheit erfolgt. Zudem verwaltet der Steuerrechner alle relevanten Simulationsmodelldaten, die erst zur Laufzeit auf den Cluster verteilt werden. Durch diese Technologie ist man heutzutage in der Lage, verhältnismäßig kostengünstig eine leistungsfähige Hardwarelösung für VR-Systeme zusammenzustellen. Mit derartigen Systemen können komplexe Szenen mit mehreren Millionen Polygonen in Stereo und mit entsprechenden Eingabesystemen dargestellt werden. Die Differenz der Anzahl der darstellbaren Polygone zwischen einem einzelnen Grafiksystem, die hunderte Millionen Polygone darstellen können, und einem Rechnercluster der mehrere Millionen Polygone darstellt, resultiert aus der Tatsache, dass ein VR-System mehr Aufgaben bewältigen muss (Eingabedatenverarbeitung, Verbundsynchronisation etc.). Ein einzelner Rechner wäre nicht in der Lage alle Aufgaben des Verbundes zu übernehmen.

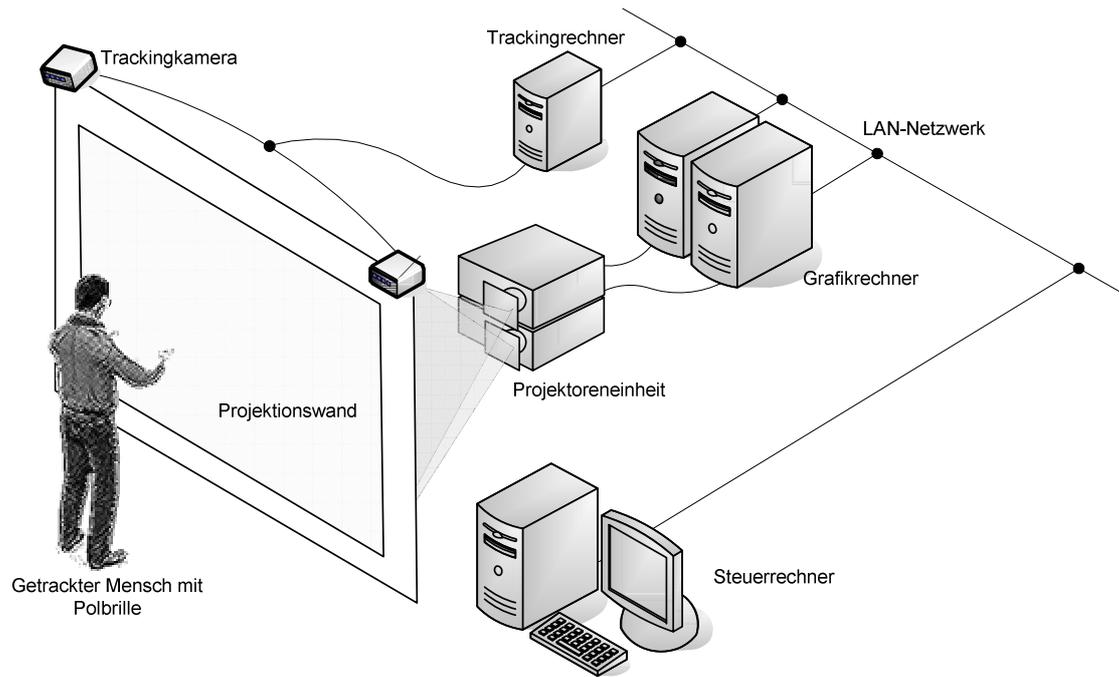


Abbildung 4-19: Hardwareaufbau mit Clustertechnik

Neben der Hardware ist vor allem die Software für das Funktionieren eines VR-Systems integraler Bestandteil, da diese alle Komponenten der Hardware zu einem Gesamtsystem verschmilzt, anwendungsspezifische Funktionalitäten zur Verfügung stellt und echtzeitnahes Arbeiten ermöglicht. Die vorrangigen Aufgaben der Software sind:

- Verwaltung des Modells der virtuellen Welt
- Steuerung, Kontrolle und Koordination (Synchronisation) sämtlicher Ein- und Ausgabesysteme
- Auswertung aller von den Eingabesystemen produzierten Daten
- Berechnung des aktuellen Zustandes der Virtuellen Realität an Hand der Modelldaten in Abhängigkeit von den Eingabedaten
- Verteilung spezifischer Informationen an die Ausgabesysteme zur Datenausgabe

Dabei ist insbesondere wichtig, dass die Software die zur Verfügung stehenden Ressourcen effizient ausnutzt und ein Arbeiten unter Echtzeitbedingungen ermöglicht. Die Verschiedenartigkeit der Aufgaben und Anwendungen deutet an, dass keine universelle Software zum Einsatz kommen kann, sondern vielmehr teilweise unabhängig voneinander operierende Software verwendet wird, die über entsprechende

Schnittstellen die benötigten Informationen austauscht. Die Software muss dementsprechend über eine leistungsfähige Programmierschnittstelle verfügen, damit die erforderliche Anpassung zur Integration unterschiedlichster Softwaremodule möglich wird. Zudem ist die Software oftmals die einzige Möglichkeit, unterschiedliche Interaktionsgeräte einzufügen. Die Software ist die Schnittstelle zwischen Entwickler und VR-Welt. Auch wenn der Benutzer in der Virtuellen Realität weitestgehend die Freiheit besitzt, den Verlauf der Simulation selbst zu bestimmen und die hierzu erforderlichen Berechnungen automatisch vom Computer ausgeführt werden, so müssen doch alle Elemente der virtuellen Umgebung und deren Eigenschaften vorab definiert werden (z.B. Definition von Kollisionsobjekten). Dies ist teilweise über einfach intuitiv zu bedienende Entwicklungsumgebungen bzw. Werkzeuge zur Szenenaufbereitung möglich, sehr oft jedoch muss für spezifische Anwendungen eine zusätzliche Programmierung der Software erfolgen [BOR-94], wozu meist profunde Kenntnisse notwendig sind.

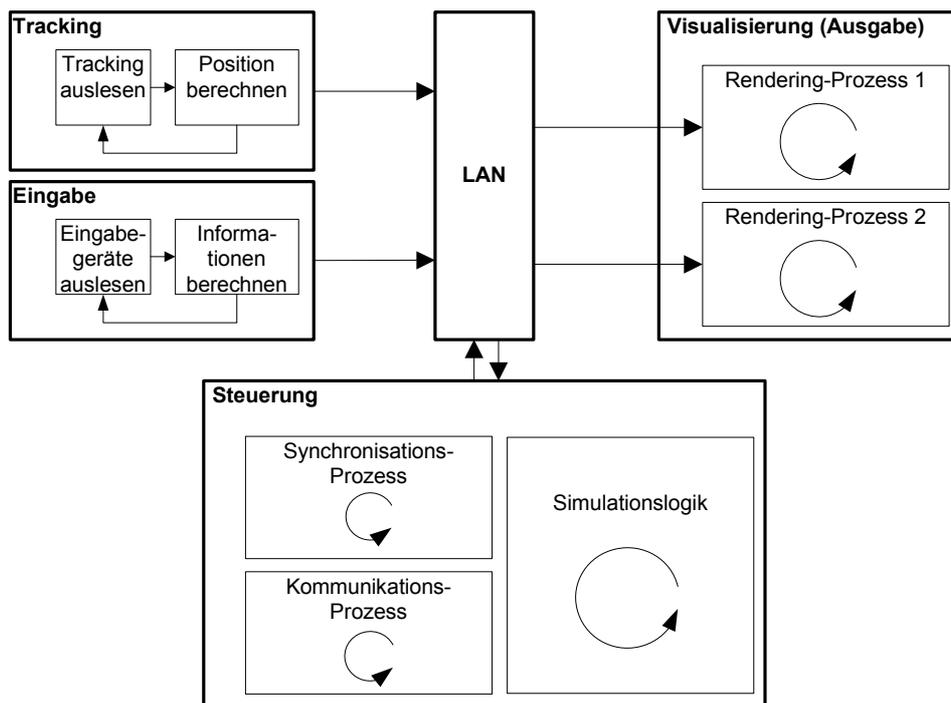


Abbildung 4-20: Softwareprozesse in einem Cluster

Auf den unterschiedlichen Rechnern (siehe Abbildung 4-19) laufen verschiedene Software-Programme. Der Kern ist die Steuerungssoftware, die alle Softwareeinzelpakete wie das Tracking und die Eingabesysteme integriert und entsprechend verwaltet. Neben dem speziellen Steuerprogramm, welches die dynamische Echtzeitsimulation kontrolliert, übernimmt ein weiterer Programmteil die Berechnung der Grafik

auf speziellen Grafikcomputern. Bei diesem Rendering genannten Verfahren werden aus den Daten des VR-Modells, der darin enthaltenen Objekte und der angeschlossenen Eingabegeräte unter Berücksichtigung der aktuellen Position des Benutzers die für ihn gerade sichtbaren Oberflächen der Objekte errechnet und gezeichnet ([BOR-94], [BUR-93], [ONG-04]). Von besonderer Bedeutung ist dabei das Geometriemodell der virtuellen Umgebung, das die Grundlage für den Rendering-Prozess bildet. Nachfolgender Abschnitt stellt dar, wie die interne Repräsentation des Geometriemodells im VR-System bzw. die Umsetzung in der Software erfolgt.

4.3.4 Geometriemodell zur Beschreibung virtueller Räume

Wie in der Definition beschrieben, wird eine virtuelle Umgebung durch eine Menge virtueller Objekte festgelegt. Jedes einzelne virtuelle Objekt ist dabei durch seine Eigenschaften beschrieben. Diese Eigenschaften sind in einem objektspezifischen Datenmodell enthalten und stehen so dem VR-System zur Verfügung. Zu den objektspezifischen Eigenschaften zählen die geometrische Beschreibung des Objektes, die Position und Orientierung im Raum, seine Strukturierung wie auch spezielle Simulationsattribute. Die geometrische Beschreibung der einzelnen Objekte bildet den Hauptteil der Objektdefinition. Auf Grundlage dieser Geometrieinformation wird dem Menschen der aktuelle Systemzustand in Form der gerenderten Szene präsentiert.

Die geometrische Beschreibung der Objekte besteht aus einer Polygonmenge, die strukturiert in einer Objekthierarchie abgelegt ist und in einer Datei gespeichert werden kann (z.B. VRML – Virtual Reality Modeling Language – Format). In einem VR-System wird diese Hierarchie durch den Szenegraphen repräsentiert.

Ein Szenegraph ist eine objektorientierte Datenstruktur, mit der die logische, räumliche Anordnung der darzustellenden dreidimensionalen Szene beschrieben ist. Aus graphentheoretischer Sicht ist ein Szenegraph ein Baum, dessen Hauptwurzel die Gesamtszene darstellt und dem unterschiedliche Elemente, auch Knoten genannt, untergeordnet sind (siehe Abbildung 4-21). Diese untergeordneten Kindknoten enthalten einzelne Objekte der Szene bzw. können auch Wurzel eines weiteren Baumes mit Kindknoten und hierarchisch angeordneten Objekten sein.

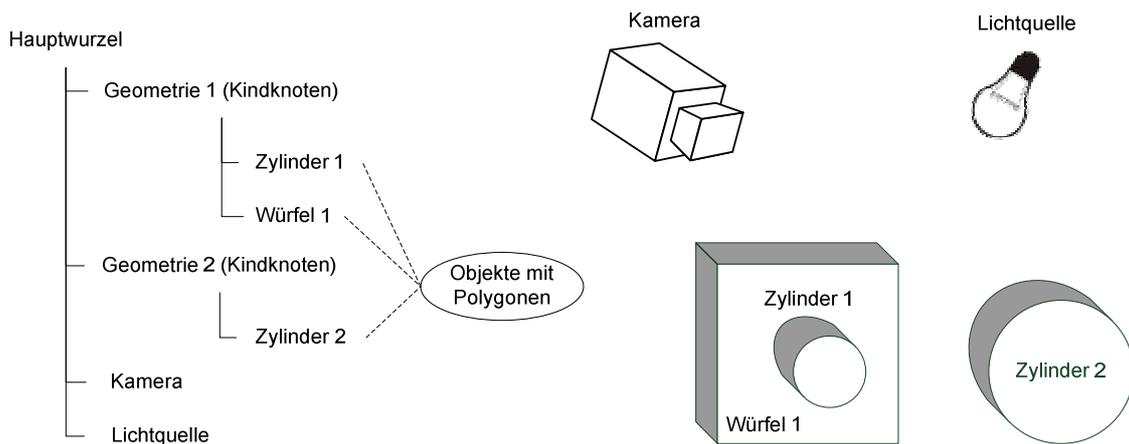


Abbildung 4-21: Szenegraph mit Objekten

Auf einen Knoten im Szenegraph können in der Regel durch die Software unterschiedliche Operationen angewandt werden, die sich auch auf alle untergeordneten Kindknoten auswirken. Für jeden Knoten steht beispielsweise eine 4x4 Matrix zur Verfügung, über die die Position und Orientierung des entsprechenden Knoten und seiner Objekte festgelegt werden kann. Die einzelnen Knoten in der Objekthierarchie sind über einen eindeutigen Namen identifizierbar. Neben Objekten, die die Geometrie beschreiben, gibt es noch Spezialobjekte wie Lichtquellen oder Kameraobjekte.

Der Anwender selbst wird ebenfalls im Geometriemodell durch ein Kameraobjekt definiert, das durch seine Position und Orientierung in der virtuellen Umgebung die Position und Blickrichtung der Augen des Menschen repräsentiert. Eingangsinformationen für die Festlegung der Position und Blickrichtung kommen vom Trackingsystem, über das der Kopf des Benutzers getrackt wird bzw. von den Interaktionsgeräten (z.B. Flystick). Zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung, z.B. mittels eines Datenhandschuhs, können dem Szenegraph genauso spezielle Repräsentationen hierfür hinzugefügt werden. In der Software wird die Logik der Interaktion abgebildet (z.B. zur Positionsveränderung von Objekten) und ermöglicht es so, verschiedene Interaktionsmodelle zu bestimmen ([BOR-94], [BUR-94], [ONG-04]).

Die Erzeugung des Geometriemodells, das mittels des Szenegraphen im VR-System visualisiert wird, erfolgt über entsprechende Modellierungswerkzeuge. Dies können zum einen CAD-Systeme (Computer Aided Design) oder auch spezielle Modellierungssysteme (3D-Studio Max, Maya usw.) z.B. für Design sein. Damit können hierarchisch strukturierte, dreidimensionale Modelle erstellt und mit gemäßen Attributen versehen werden. Über passende Schnittstellen bzw. Datenformate können die Informationen in das VR-System transferiert werden. An der Schnittstelle treten dabei

in der Regel Datenverluste auf, was bedeutet, dass nicht alle Attribute übernommen werden können. Beispielsweise werden Materialeigenschaften, wie sie für FEM-Berechnungen benötigt werden, nicht in die Virtuelle Realität transformiert, sondern lediglich die geometrischen Aspekte (Flächen etc.). Bei der Modellerstellung ist zu beachten, dass die geometrischen Modelle entsprechend der Forderung nach Echtzeitfähigkeit zu modellieren sind. Das Thema der Modellerstellung wird in nachfolgenden Kapiteln nochmals aufgegriffen und eingehender erläutert.

4.4 Anwendungen der VR-Technologie

Die heute wohl bekannteste VR-Anwendung ist der Flugsimulator zum Training von Piloten. Während die VR lange Zeit auf diese oder ähnliche Anwendungen vor allem im militärischen Bereich beschränkt war, so haben sich heute zahlreiche Anwendungsfälle auch im industriellen Umfeld ergeben. In den 90er Jahren standen die VR-Basistechnologien im Vordergrund, die mit der rasanten Entwicklung der Rechner-technologie einhergingen. Mitte der 90er wurde neben Anwendungen in der Medizin, Unterhaltung, Schulung, Kunst, Architektur und Wissenschaft, auch mit der Entwicklung von Anwendungen für die Produktentwicklung bzw. Produktion begonnen, wobei der Fokus der Betrachtungen auf dem Produktdesign, der Produktergonomie, der Montage und der Anwendung in der Robotik lag ([BOR-94], [BUR-94]). Gegen Ende der 90er Jahre waren erste kommerzielle Systeme bereits erhältlich. Vor allem im Automobilbau sowie in der Luft- und Raumfahrtindustrie hat sich die Virtuelle Realität in den letzten Jahren als mittlerweile anerkanntes und geschätztes Hilfsmittel etabliert. Die Palette der Anwendungen erweiterte sich dabei um erste Ansätze in der Fabrik- bzw. Anlagenplanung. Trotzdem befindet sich hier der Einsatz der VR-Technologie in vielen Bereichen noch in den Anfängen und gilt vorrangig als Forschungsfeld von Instituten. Nachfolgend wird in Anlehnung an die Arbeit von Runde [RUN-07] ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung bzw. Technik der Virtual Reality Anwendungen auf dem weitreichenden Gebiet der Digitalen Fabrik, die Themen der Fabrikplanung und Logistikplanung beinhaltet, gegeben. Das Thema der Digitalen Fabrik wurde in Kapitel 3 (Grundlagen der Planung) bereits näher behandelt.

Montage- und Fertigungsprozessplanung

Anwendungen der VR in der Montageplanung besitzen die zwei Fokusse Montage-systemplanung und Evaluierung der Montierbarkeit eines Produktes (siehe Abbildung 4-22). Die Planung von Montagesystemen kann ein Tätigkeitsfeld von der Montageli-nienplanung bis hin zur Gestaltung und Bewertung manueller Montagetätigkeiten umfassen. Hierzu wurden verschiedene Anwendungen umgesetzt, wobei diese heute schon teilweise im industriellen Umfeld eingesetzt werden.

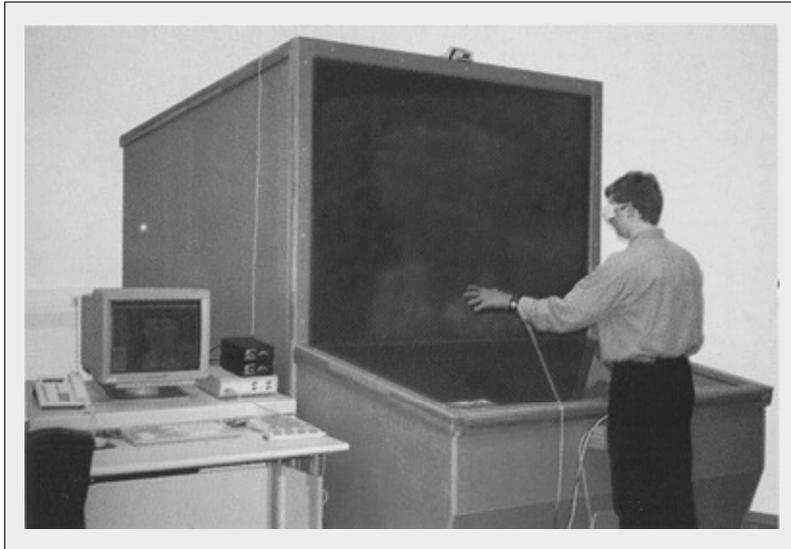


Abbildung 4-22: Mensch bei der Montageplanung [LRZ-08]

Für die Planung von Fertigungsprozessen wurden VR-Anwendungen entwickelt, die das schnelle, korrekte Erfassen des gefertigten (Zwischen-)Produkts ermöglichen. Häufig angewandte Methode ist dabei das vergleichende Visualisieren der Ergebnisse alternativer Fertigungsprozesse. Realisierungen erfolgten für das Urformen, das Umformen, das Trennen, das Fügen und das Beschichten.

Robotik

VR-Anwendungen in der Robotik wurden entwickelt zur Bewegungsvorgabe und -überprüfung bei Robotern. Beide Zwecke sind sowohl in Form isolierter Anwendungen, also rein virtuell, verfolgt worden als auch in Kopplung mit einem physisch-realen Robotersystem. Damit wurden also sowohl die Überwachung als auch die Steuerung eines Roboters mittels seines digitalen Gegenstücks ermöglicht.

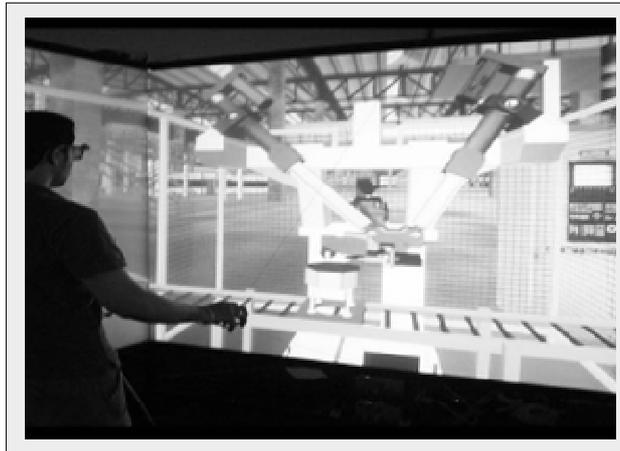


Abbildung 4-23: Virtual Reality in der Robotik [RUN-07]

Arbeitsplatzgestaltung

In der Arbeitsplatzgestaltung wurden Virtuelle Umgebungen entwickelt, um ergonomische und prozesszeitbedingte Fragestellungen anzugehen. Diese können in den Haltungs- und Bewegungsanforderungen an den für diesen Arbeitsplatz vorgesehenen Mitarbeiter liegen, in der Anordnung der Bereitstellungsbehälter oder den infrastrukturellen Arbeitsbedingungen wie Licht, Luft und Beschallung.

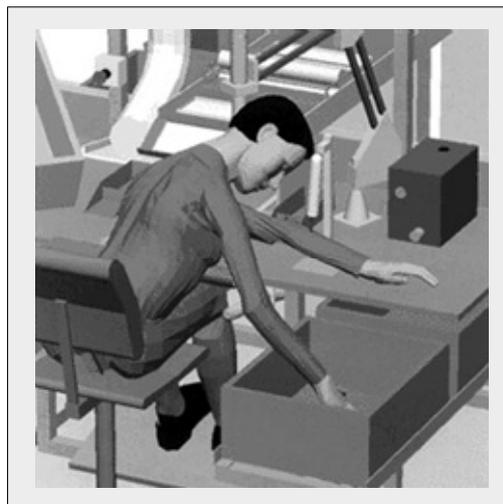


Abbildung 4-24: Modell eines Arbeitsplatzes mit Mensch [BGE-08]

Steuerungstechnik

Der Einsatz von VR im Umfeld der Steuerungstechnik hat zum Ziel, das Zusammenspiel aus Steuerungslogik, Sensorik und Aktorik zu gestalten oder zu überprüfen. Die eingesetzten Systemarchitekturen unterscheiden sich stark hinsichtlich des Einbezugs der tatsächlichen Komponenten der Steuerungstechnik wie der Programmlogik und technischer Bauteile. Einfachste VR-Anwendungen deuten selbst eine Programmlogik nur an, andere integrieren Steuerungssimulatoren oder erlauben den Anschluss speicherprogrammierbarer Steuerungen an den VR-Rechner.



Abbildung 4-25: Virtueller Anlagensteuerungstest [SCH-08]

Planung von Materialflusssystemen

In der Planung von Materialflusssystemen wurden erste Versuche unternommen die VR einzusetzen, um die Gestaltung und Ansteuerung von Fördertechnik und Lagern im Zusammenspiel mit den belieferten Arbeitsstationen durchzuführen oder zu unterstützen. Zu diesem Zwecke werden geometrischfunktionale Modelle der Fördertechnik mit Aspekten der Steuerungstechnik virtuell in Betrieb genommen. Dabei wird die Virtual Reality meist nur als reine Visualisierungstechnik genutzt, in der dem Menschen nur wenige Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Dadurch wird das Potenzial, Materialflusssysteme die sich in der Planung befinden durch den Menschen in der VR aktiv erproben und analysieren zu lassen, nicht ausgeschöpft. Dieses Manko wird mittels der Menschintegrierte Simulation ausgeräumt, indem über entsprechende Interaktionsmechanismen der Mensch in die virtuelle Welt eintauchen und diese erleben kann.

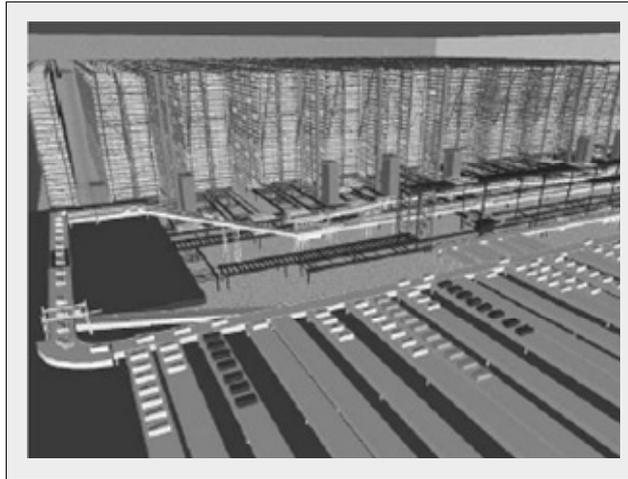


Abbildung 4-26: Modell eines Materialflusssystems [RUN-07]

Logistik

Diese VR-Anwendungen haben die Analyse logistischer Systeme zum Inhalt. Dazu werden räumlich auf ein Fabriklayout bezogene logistische Kennzahlen in einer virtuellen Umgebung dargestellt und vom Nutzer betrachtet. Der Anwender hat durch die anschauliche Darstellungen der Kennzahlen in Koordinatensystemen, deren Achsen nicht mehr räumlichen, sondern logistischen Größen entsprechen, die Möglichkeit, Systeme schnell und effizient auf Basis der visuellen Eindrücke zu analysieren ([WES-06], [RUN-07]).

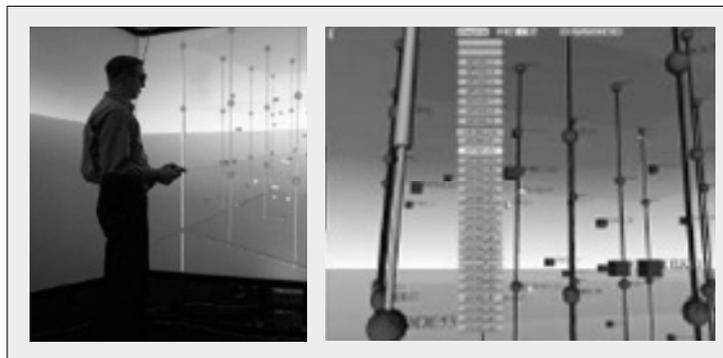


Abbildung 4-27: Darstellung logistischer Kennzahlen in der VR [RUN-07]

Training und Sicherheitstechnik

Der Einsatz von VR im Umfeld der Qualifizierung zielt darauf ab, Arbeitsabläufe und Tätigkeiten vorzuführen oder deren Durchführung durch den Bediener zu veranlassen und zu protokollieren. Weiterhin können Situationen nachgestellt werden, die in der Realität ein Risiko aus dem Blickwinkel der Sicherheit oder finanzieller Art darstellen. In der Sicherheitstechnik wird VR eingesetzt, um Systeme des Arbeitsschut-

zes zu konzipieren und Modelle von Arbeitsschutzsystemen mit der Einbeziehung des Bedieners als Menschmodell zu evaluieren. An der Universität Stuttgart wurde beispielsweise ein virtueller Kransimulator in Betrieb genommen, um mit dem Menschen durch Simulation und Training sicherheitstechnische Aspekte zu verbessern [IFT-07].



Abbildung 4-28: Virtueller Kransimulator [IFT-07]

Außerhalb dieser Anwendungsfelder werden Themen wie VR-gestützte Anlagenprojektierung, Dokumentation, Vertriebsunterstützung usw. verfolgt. Hervorzuheben sind noch VR-Anwendungen, die in der Fabrikplanung Gestaltungs- und Bewertungsaufgaben in den Feldern „Generalbebauung“, „Gebäudekomplexe“ und „Anordnung von Einzelgewerken“ zum Inhalt haben ([BRA-02], [IFF-05], [WIE-02], [WES-06]).

Die Thematik der VR-Unterstützung in der Logistiksystemplanung wurde bislang nur exemplarisch aufgegriffen, um Einsparpotenziale, die durch VR-Technologie auf diesem Einsatzgebiet erreicht werden können, an Hand anwendungsnaher Versuche nachzuweisen. Als Ergebnis dieser exemplarisch umgesetzten Anwendungen konnte allgemein ein Potenzial zur Zeit- und Kosteneinsparung bzw. zur Qualitätssteigerung identifiziert werden, wobei einer Studie des Fraunhofer IPA zufolge eine Kosten- und Zeiteinsparung von mehr als 20% bzw. eine Fehlerreduktion von 10 – 20% realisierbar sind [IPA-06]. Grund für diese Potenziale sind hauptsächlich eine eingängige Informationsbereitstellung und die Möglichkeit eines intuitiven Arbeitens in der virtuellen Welt. Ebenso wurde der Einsatz zur Logistikmitarbeiterschulung noch nicht untersucht, lässt aber viel Verbesserungspotenzial erwarten, da Menschen sowohl auf einzelnen Logistiksystemen ausgebildet werden können, aber auch die Möglichkeit besteht, Mitarbeiter für die komplexen, logistischen Zusammenhänge zu sensibilisie-

ren, wodurch eine Leistungs- und Qualitätssteigerung bei operativen Tätigkeiten zu erwarten ist.

4.5 Zusammenfassung

Dieser Abschnitt hat gezeigt, dass es sich bei der Virtuellen Realität um ein sehr komplexes und vielschichtiges Thema handelt. Dies verdeutlicht sich vor allem auch in der Definition des Begriffes, die in der Literatur unter den verschiedensten Betrachtungsweisen entsprechend unterschiedlich ausfällt. Dennoch wurde für diese Arbeit eine eindeutige, praktikable Definition erarbeitet. Der allgemeine Aufbau eines Virtual Reality Systems mit seinem Ausgabe- und Eingabekanal, der Soft- bzw. Hardware sowie einem Geometriemodell wurde überblicksweise behandelt, wobei auf die wesentlichsten Charakteristiken eingegangen wurde. Dazu erfolgte eine Vorstellung aktueller Entwicklungen und Tendenzen vor allem im Rahmen der eingesetzten Gerätschaften. Ein Überblick über aktuelle Anwendungen der Virtual Reality rundet dieses Kapitel ab. Die Anwenderszenarien haben gezeigt, das Arbeiten zur Nutzung der VR-Technik zur Menschintegrierten Simulation in der Materialflussplanung nicht vorliegen. Lediglich der am IFT der Universität Stuttgart entwickelte Kransimulator [IFT-07] kann in eine engere Beziehung zur Menschintegrierten Simulation gesetzt werden. Beide Ansätze verfolgen aber unterschiedliche Zielsetzungen und sind damit eindeutig differenzierbar. Während der Kransimulator primär der Schulung und dem Training sicherheitstechnischer Aspekte beim Kranfahren dienen soll, ist das Primärziel der Menschintegrierten Simulation die Planungsunterstützung. Dementsprechend unterscheiden sich die Interaktionsmechanismen und der gesamte Aufbau der Simulationsumgebungen.

5 Menschintegrierte Simulation mittels VR

Im Rahmen dieser Arbeit gilt es, einen neuen Simulationsansatz zu schaffen und zu analysieren, bei dem der Mensch in bisher ungekannter Art und Weise in Planung bzw. Gestaltung involviert wird. Die vorliegende Abhandlung soll aufzeigen, dass menschenbezogene Prozesse der Logistik (z.B. manueller Kommissioniervorgang, Anlagenbedienung usw.) realitätsnah in der Virtuellen Realität abgebildet und wirklichkeitstreu nachvollzogen werden können, um die Planung unter Berücksichtigung des Faktor Mensch wesentlich zu verbessern. Das Ziel ist es, erstmals realistische Leistungskennwerte des Materialflusses zur Bewertung unterschiedlicher Planungsvarianten zu ermitteln und das Materialflusssystem in einem Iterationsprozess zu verbessern. Dadurch wird in der Planung die Möglichkeit geschaffen, Materialflusssysteme, die auch als komplexe Mensch-Maschine Systeme betrachtet werden können, im Labor unter quasi-realistischen Bedingungen vom Menschen erproben zu lassen und vorab zu optimieren.

5.1 Definition

Im Folgenden soll der Begriff „**Menschintegrierte Simulation**“ (MI-Simulation) geprägt werden. Dieser Begriff charakterisiert dabei eine Simulationsmethode, die eine meist real nicht existente Umgebung für den Menschen unter Verwendung der Virtual Reality intuitiv erlebbar macht und ihn aktiv in die Simulation mit einbezieht. In Analogie zu „Hardware in the Loop“, bei der meist eine reale Hardwarekomponente in Kombination mit einem virtuellen Modell getestet wird, könnte auch von „Men in the Loop“ in diesem Zusammenhang gesprochen werden. Dennoch soll nachfolgend der Begriff Menschintegrierter Simulation weiterhin verwendet werden. Mit Fokus auf die Logistik erlaubt dieser Ansatz die Analyse virtueller Materialflusssysteme in Kombination mit der realen Komponente Mensch. Der Mensch selbst ist über geeignete Interaktionsmechanismen in die Simulation integriert und beeinflusst so das Verhalten der Simulation aktiv und kann dabei das Materialflusssystem wirklichkeitsnah analysieren und bewerten. Der Begriff kann in Hinblick auf die Materialflussplanung definiert werden als Echtzeitsimulation mittels Virtual Reality, die die reale Kompo-

nente Mensch in eine virtuelle Materialflussumgebung integriert und diese für ihn intuitiv erlebbar macht, wobei der Mensch die Simulation aktiv beeinflusst und die virtuelle Umgebung zum Zwecke der Planung wirklichkeitsnah analysieren und bewerten kann.

5.2 Einsatzfelder und Zielgruppen in der Materialflussplanung

Einsatzfelder und Zielgruppen für den MI-Simulation Ansatz definieren sich aus dem Planungsgegenstand, der Planungsphase und den an der Planung beteiligten Personen. In Kapitel 2 und 3 wurden der Planungsgegenstand und das Planungsvorgehen vor allem in Bezug auf den Menschen näher erläutert. Die Aufgabe des MI-Simulationsansatzes im Umfeld der Materialflussplanung ist es, den Menschen verstärkt in den Planungsprozess zu integrieren. Dies geschieht durch eine eingängige visuelle Darstellung des Planungsgegenstandes in einer virtuellen Umgebung, verbunden mit der Möglichkeit das Modell direkt mittels geeigneter Benutzerschnittstellen zu manipulieren bzw. mit dem Simulationsmodell unter realistischen Bedingungen zu interagieren. Die dynamische Simulation der Prozesse unter quasi-realen, geometrischen Gegebenheiten bezieht alle Beteiligten in die Planung ein, fördert das Verständnis aller und ermöglicht erstmals die wirklichkeitsgetreue Abbildung und Analyse materialflusstechnischer Prozesse, bei denen der Mensch zum Einsatz kommt.

Grundsätzliche Ziele sind in allen Fällen eine hohe Anschaulichkeit, die Bildung einer gemeinsamen Kommunikationsgrundlage und die realistische menschenorientierte Untersuchung geplanter Materialflusssysteme. Dieser Ansatz hat somit hohen Stellenwert für alle an der Planung und Umsetzung Beteiligten.

5.2.1 Einsatzfelder

Die Einsatzfelder der Menschintegrierten Simulation können sich beginnend bei der Grobplanung über alle Phasen/Tätigkeiten einer Planung erstrecken (siehe Abbildung 5-1) und zusätzlich um weitere Einsatzfelder aus dem Unternehmensfeld ergänzt werden. Grundsätzlich eignet sie sich dabei für alle Planungsgegenstände, in denen der Mensch eine zentrale Rolle einnimmt und die nicht eindeutig determinis-

tisch bestimmt sind, so z.B. die manuelle Kommissionierung. Planungsunsicherheiten verursacht durch den Faktor Mensch können mittels der MI-Simulation minimiert werden. Der Einsatz der MI-Simulation hängt also wesentlich davon ab, mit welchen menschverursachten Unsicherheiten/Ungenauigkeiten zu rechnen ist. Signifikante Vorteile der MI-Simulation liegen in der Möglichkeit zur Untersuchung

- real (noch) nicht existenter Systeme,
- real existierender Systeme ohne direkten Betriebseingriff,
- mehrere Gestaltungsvarianten bei geringem Arbeitsaufwand und
- des Systemverhaltens unter Einbeziehung der realen Komponente Mensch.

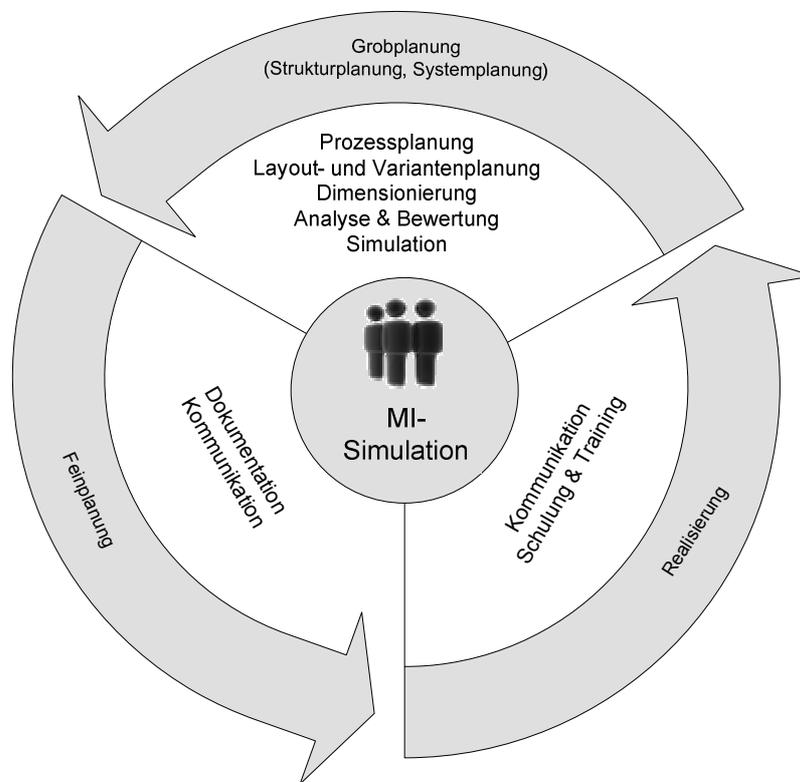


Abbildung 5-1: Planung und Menschintegrierte Simulation – Einsatzfelder

Folgender Abschnitt dokumentiert potenzielle Einsatzfelder der Menschintegrierten Simulation in der Materialflussplanung bei verschiedenen Planungstätigkeiten. Als Orientierungspunkt zur Definition der Einsatzfelder dient primär das im Abschnitt 3.2 dargestellte Planungsvorgehen mit den erläuterten Arbeitsschritten in den einzelnen Planungsphasen (z.B. Layoutplanung, Prozessplanung etc.). Darüber hinaus erfolgt die Einsatzszenariendefinition in Anlehnung an die VDI 3633 Blatt 11 (Simulation und Visualisierung) [VDI-3633].

Prozessplanung

Diese Phase dient der Planung und Optimierung der Abläufe in einem produktionstechnischen bzw. logistischen System. Durch die Integration des Menschen in eine virtuelle Umgebung mit der Möglichkeit realistisch mit der Umgebung zu interagieren, können Prozesse vom Benutzer nachvollzogen und analysiert werden. Es können Arbeitsplätze genutzt und Maschinen bedient werden. Dadurch wird die Evaluierung und Optimierung der Prozesse unter Einbeziehung des Menschen zu einem frühen Zeitpunkt möglich. Zudem ist es möglich, den Planer mittels spezifischer Informationen bzw. Anmerkungen (z.B. Sankey-Diagramm, Textinformationen etc.) in der VR-Welt zu unterstützen.

Layout- und Variantenplanung

Mittels geeigneter Verfahren ist eine Anwendung der MI-Simulation zur Layoutplanung bzw. der Planung von Layoutvarianten möglich. Die dreidimensionale Darstellung aller Gewerke und Anlagen, kombiniert mit der Möglichkeit diese unter Einsatz geeigneter Interaktionsgeräte zu „betreten“ und zu untersuchen, eröffnet dem Planer vollkommen neue Möglichkeiten. Beispielsweise kann in dieser Phase bereits der Werksschutz verstärkt integriert und effiziente Evakuierungspläne mit zugehörigen Fluchtwegen in der Layoutplanung berücksichtigt werden. Personen unterschiedlichster Planungsrichtungen sind in der Lage, verschiedene Layouts zu „benutzen“ und zu analysieren. Die MI-Simulation unterstützt dadurch die zunehmende Parallelisierung der Planungsschritte.

Auswahl der Materialflussmittel und Dimensionierung des Materialflusssystems

Gerade wenn das Personal gewissermaßen als „Materialflussmittel“ eingesetzt wird, ist es schwierig logistische Einrichtungen vor allem in Verbindung mit der Materialflusstechnik richtig zu dimensionieren. Durch den Einsatz der Menschintegrierten Simulation lassen sich beispielsweise Prozesszeiten bezüglich des Personals ermitteln, die zur Dimensionierung herangezogen werden können. Es können in Kombination mit der Ablaufsimulation sofort Bottleneck-Situationen erkannt und in einer Iterationsschleife eliminiert werden.

Systemanalyse und Bewertung von Systemvarianten

Im Bereich der Systemanalyse und Bewertung von Systemvarianten verspricht der Einsatz der Menschintegrierten Simulation großes Potenzial. Komplette Prozesse

können in der Virtuellen Realität unter Einflussnahme des Menschen simuliert werden. Mit Hilfe geeigneter Interaktionsmedien bzw. Interaktionsmetaphern kann der Benutzer komplexe Systeme der Materialflusstechnik analysieren und bewerten. Angefangen von Zeitstudien, Ergonomiestudien bis hin zu kompletten Ablaufstudien.

Unterstützung der Materialflusssimulation

Die Menschintegrierte Simulation kann als eigenständige Simulationstechnik oder als sinnvolle Ergänzung zur Ablaufsimulation gesehen werden. Die im Rahmen der MI-Simulation gewonnenen Kennzahlen eignen sich beispielsweise als Input für Ablaufsimulationsmodelle (z.B. Zeiten). Umgekehrt können aber genau so gut die Ergebnisse einer Ablaufsimulation in der Virtuellen Realität visualisiert und vom Menschen erlebt werden. Dadurch lässt sich auch Nicht-Simulationsexperten der Zugang zu Simulationsergebnissen einfach ermöglichen.

Schulung und Training

Ein Einsatzfeld der Menschintegrierten Simulation ist im Bereich Mitarbeiterschulung und Trainingsprogramme zu sehen. So können mit Hilfe interaktiver Modelle zukünftig Anlagenbetreiber und Mitarbeiter schon im Vorfeld in anschaulicher und realitätsnaher Form die Bedienung eines neuen Systems erlernen.

Absatzförderung und Außendarstellung

Sowohl qualitativ hochwertige Animationen und Virtual Reality als auch Darstellungen von Kennzahlen können im Bereich der Absatzförderung und Außendarstellung zum Nachweis von Produkt- und Anlagenqualität sowie der Fachkompetenz des Unternehmens verwendet werden.

Dokumentation und interdisziplinäre Kommunikation

Die anschauliche Informationsdarbietung sowohl der Eingangsdaten eines Simulationsmodells als auch der Simulationsergebnisse stellt insbesondere in der Fein- bzw. Realisierungsplanung das grundlegende Medium für eine interdisziplinäre Kommunikation aller beteiligter Personenkreise dar. Prozesse und Layouts können verfeinert und evaluiert sowie unter den ausführenden Unternehmen kommuniziert werden. Zudem können relevante Informationen (z.B. Ergebnisdarstellung, Annotationen) sowie VR-Modellzustände (z.B. unterschiedliche Ansichten) zu Dokumentationszwe-

cken im Modelle gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgerufen werden.

5.2.2 Zielgruppen

Der MI-Simulationsansatz repräsentiert eine neuartige Schnittstelle zum Anwender, die es ihm ermöglicht, u. a. Abläufe der Logistik realitätsnah zu untersuchen. Es gilt nachfolgend die Zielgruppen der Menschintegrierten Simulation in Analogie zur VDI 3633 - Blatt 11 (Simulation und Visualisierung) zu definieren [VDI-3633]. Die aufgeführten Zielgruppen berücksichtigen die involvierten Funktionseinheiten eines Unternehmens, wobei eine Gruppe auch aus einer Einzelperson bestehen und eine Person durchaus mehrere Funktionen in verschiedenen Gruppen ausüben kann.

Simulationsexperten

Diese Zielgruppe umfasst die primären Anwender der Simulationstechnik, die alle Phasen der Menschintegrierten Simulation durchgängig bearbeiten. Dadurch können spezifische Planungsansätze in der Virtuellen Realität von Experten untersucht und bewertet werden.

Planung

Die planenden Bereiche sind unter Einbeziehung der Konstruktion für die Organisation der Prozesse, die Planung der Anlagen und die Realisierungsbegleitung zuständig und liefern die Eingangsdaten für die Menschintegrierte Simulation. Sie sind die direkten Adressaten von Simulationsergebnissen, bzw. können ihre geplanten Anlagen in der Virtuellen Realität selbst erproben und analysieren.

Management

Hierunter sind Entscheidungsträger zu verstehen, die u. a. für die Wahl des Anlagenkonzeptes verantwortlich sind. Ergebnisse aus Planung und Menschintegrierter Simulation dienen als Entscheidungsgrundlage, die in einer möglichst komprimierten und anschaulichen Darstellung benötigt werden.

Technischer Einkauf

Der technische Einkauf vergleicht Angebote und die zugehörigen Planungs- und Anlagevarianten. Für die Kommunikation mit Lieferanten und Komponenten- oder Anla-

gen-Hersteller ist eine möglichst anschauliche und realitätsnahe Abbildung der Ergebnisse von Vorteil, um Missverständnisse zu vermeiden.

Werkstechnik und -betrieb

Unter dieser Zielgruppe sind sowohl Instandhaltung als auch administrative Bereiche wie Feuerwehr, Werks- und Arbeitssicherheit oder der Betriebsrat zu verstehen. Diese sind für die Erhaltung des laufenden Betriebs und die Sicherheit verantwortlich. Mittels einer realitätsnahen Erprobung der Anlagen im Rahmen der Menschintegrierten Simulation ist eine frühe Überprüfung auf die Einhaltung von Richtlinien möglich, z.B. in Form einer virtuellen Anlagenbegehung.

Produktion und Logistik

Die operativen Abteilungen im Bereich Produktion und Logistik nutzen die Menschintegrierte Simulation für eine frühzeitige Einbeziehung des Anlagenbetreibers und des Personals, beispielsweise zur Schulung während der Einführung neuer Produkte.

Vertrieb und Marketing

Die Aufgabe von Vertrieb und Marketing ist die Kommunikation mit externen Partnern bzw. Kunden. Für diesen Zweck werden Simulationsmodelle benötigt, um die Funktion und die Vorteile der Anlage als Produkt oder ihre Leistungsfähigkeit präsentieren zu können.

Kunde

Der Kunde ist direkter Adressat der Präsentation von Vertrieb und Marketing. Die Menschintegrierte Simulation hat das Ziel, seine Kaufentscheidung zu unterstützen. Weiterer Nutzen besteht in den Bereichen der Schulung des Kunden im Umgang mit der Anlage als Produkt, beispielsweise durch ein kundenspezifisches Parametrisieren und Experimentieren im Simulationsmodell.

Öffentlichkeit

Ein Unternehmen kann die Menschintegrierte Simulation insbesondere zur Imagebildung in der Öffentlichkeit im Sinne der Public Relation in Bezug auf Kompetenz und technisches Know-How nutzen.

5.2.3 Relevanz der Menschintegrierten Simulation für Einsatzfelder und Zielgruppen

Die folgende Beziehungsmatrix stellt die genannten Einsatzfelder (siehe Abschnitt 5.2.1) mit den zuvor definierten Zielgruppen in Beziehung und klassifiziert diese nach deren Relevanz bezüglich des Einsatzes der MI-Simulation. Die Tabelle soll zudem einen visuellen Überblick darüber verschaffen, für welche Einsatzfelder und Zielgruppen die zu realisierende Versuchsplattform im Kontext der Kommissioniersystemplanung besonders interessant ist. Grau hinterlegte Felder stellen relevante Anwendungsfelder hierfür dar. Beispielsweise hat die Simulationsplattform eine hohe Relevanz zur Systemanalyse & Bewertung in der Planung, da komplexe Prozesse der Kommissionierung nachvollzogen und evaluiert werden können.

Einsatzfelder \ Zielgruppen	Zielgruppen								
	Simulationsexperte	Planung	Management	Technik & Einkauf	Werkstechnik & Betrieb	Produktion & Logistik	Vertrieb & Marketing	Kunde	Öffentlichkeit
Prozessplanung	●	●		○		○			
Layout & Variantenplanung	◐	●		○	◐	●		●	
Auswahl & Dimensionierung		●		◐	○	●			
Systemanalyse & Bewertung	●	●	●	●	○	●	●	●	
Materialflusssimulation	●	◐							
Schulung & Training						●	◐	●	
Absatzförderung & Außendarstellung				●			●	●	●
Dokumentation & Kommunikation	●	●	●	●	●	●	●	●	
● voll zutreffend ◐ teils zutreffend ○ kann zutreffen									

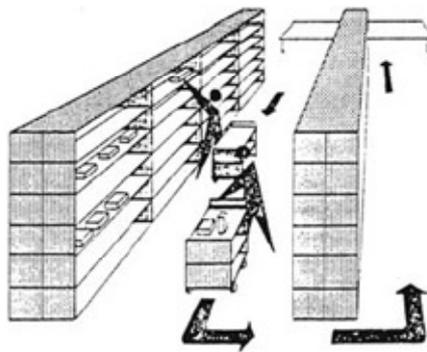
Tabelle 5-1: Relevanz der MI-Simulation bezüglich Zielgruppen und Einsatzfelder

6 Konzipierung und Realisierung einer Plattform zur MI-Simulation

Um die Potenziale der Menschintegrierten Simulation zu untersuchen, wird eine Simulatorplattform konzipiert, entwickelt und zu Testzwecken umgesetzt. In Versuchen soll bezüglich der Menschintegrierten Simulation diskutiert werden, wie mittels dieses Ansatzes realistische Kennwerte ermittelt und zu Planungszwecken verwendet werden können. Nachfolgender Abschnitt befasst sich mit dem konzeptionellen Aufbau der Simulationsplattform zur Menschintegrierten Simulation sowie deren Realisierung. Das Szenario, an dem sich die zu erstellende Plattform für die experimentellen Untersuchungen orientiert, ist die manuelle Kommissionierung nach dem Prinzip „Mann zur Ware“. Auf Basis dieses Szenarios soll die MI-Simulation an Hand der Plattform evaluiert werden. Anknüpfend wird deshalb das Beispielszenario kurz erläutert, um anschließend die Anforderungen an die Plattform zu formulieren. Das Szenario der manuellen Kommissionierung wurde gewählt, da es eine der schwierigsten Aufgaben der innerbetrieblichen Logistik ist und komplexe durch den Mensch vollzogene Tätigkeiten beinhaltet.

6.1 Erläuterung des Beispielszenarios „Manuelle Kommissionierung“

Die Grundlagen der Kommissionierung wurden bereits in Kapitel 2.4 vorgestellt. Das Beispielszenario beschreibt ein Kommissioniersystem mit statischer Bereitstellung, manueller Entnahme, eindimensionaler Fortbewegung sowie zentraler Abgabe und stellt damit ein typisches „Mann zur Ware“ System dar (siehe Abbildung 6-1).



Bereitstellung:	statisch
Entnahme:	manuell
Fortbewegung:	eindimensional
Abgabe:	zentral

Abbildung 6-1: Gewähltes Kommissioniersystemszenario [GÜN-07b]

Die auftragsweise-sequentielle Organisation ist die einfachste Art der Kommissionierung und wird am häufigsten verwendet. Hier erhält der Kommissionierer einen Kundenauftrag, an Hand dessen er die Artikel im Lager reihenweise nacheinander zusammensammelt und ihn dann komplett im Warenausgang abgibt. Diese Art der Kommissionierung soll zur nachfolgenden Gestaltung und Realisierung der Plattform als Beispielszenario dienen. Durch die Wahl dieses Beispielszenarios ist der Ablauf einer Simulation grob vorgegeben und stellt sich wie folgt dar (siehe Abbildung 6-2).

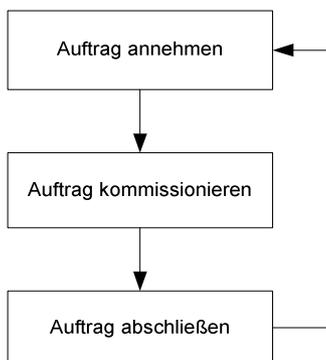


Abbildung 6-2: Grober Ablauf der Kommissionierung

Zur Umsetzung des räumlich-geometrischen Szenarios dient das in der Versuchshalle des Instituts installierte Kommissioniersystem als Vorlage (siehe Abbildung 6-3). Dabei handelt es sich um ein kleines Lagersystem mit zwei Gassen und den entsprechenden Artikeln und Equipment zum Kommissionieren.



Abbildung 6-3: Versuchshalle des Instituts

6.2 Anforderungen an die Menschintegrierte Simulation

Aus dem im vorangegangenen Abschnitt geschilderten Beispielszenario zur Realisierung der Versuchsplattform ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die bei der Konzipierung der Plattform beachtet werden müssen. Um diese Anforderungen zu ermitteln, wird ein Anwendungsfalldiagramm (engl. Use Case Diagram) erstellt. Ein Anwendungsfalldiagramm ist eine der dreizehn Diagrammarten der Unified Modeling Language (UML), einer Sprache für die Modellierung der Strukturen und des Verhaltens von Software und anderen Systemen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um ein Verhaltensdiagramm, das eine bestimmte Sicht auf das erwartete Verhalten eines Systems zeigt und deshalb für die Spezifikation der Anforderungen an ein System eingesetzt wird. In einem Anwendungsfalldiagramm werden typischerweise Anwendungsfälle (abgebildet durch Ellipsen) und Akteure mit ihren Abhängigkeiten und Beziehungen dargestellt [WIK-08d]. Es zeigt dabei das äußerlich erkennbare Systemverhalten aus der Sicht eines Anwenders.

Abbildung 6-4 zeigt das Anwendungsfalldiagramm für die Versuchsplattform, das primär die Beziehungen zwischen dem Akteur „Proband“ und der Simulationsplattform festhält. Ein Proband benötigt zehn Anwendungsfälle, um das Beispielszenario realistisch in einer Simulation abbilden zu können. Virtual Environment Objekte (VE-Objekte) kommissionieren ist der komplexeste Anwendungsfall, da er sechs andere

Anwendungsfälle verwendet. Elementar für diesen sind der Anwendungsfall Virtual Environment begehen (VE-begehen) und Objekte manipulieren, da sie die grundlegende Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Umgebung beschreiben. Diese setzen sich wiederum aus weiteren Anwendungsfällen zusammen, die in der Abbildung 6-4 zu finden sind.

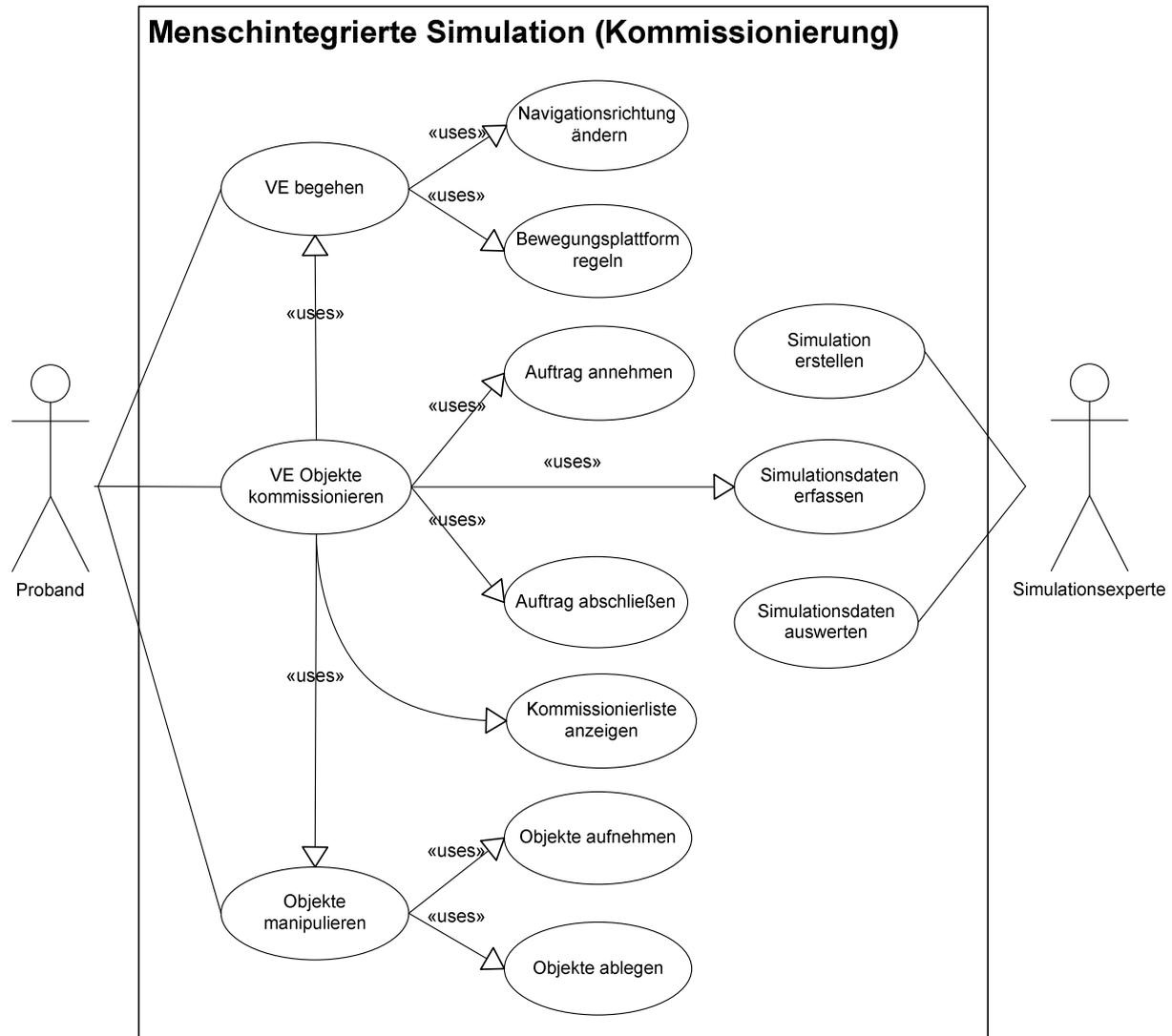


Abbildung 6-4: Anwendungsfalldiagramm für die Versuchsplattform

Um einen Kommissioniervorgang vollständig simulieren und entsprechende Daten gewinnen zu können, muss die Versuchsplattform die Anwendungsfälle Auftrag annehmen, Auftrag abschließen, Kommissionierliste anzeigen und Simulationsdaten erfassen abdecken. Auf der gegenüberliegenden Seite steht der Akteur „Simulationsexperte“, der neben dem Proband ebenfalls eine wichtige Rolle einnimmt. Er erstellt Simulationen in der Phase der Vorbereitung und wertet die erzielten Simulationsergebnisse im Anschluss aus. Für den Akteur „Simulationsexperte“ gilt es des-

halb, die Anwendungsfälle Simulation erstellen und Simulation auswerten umzusetzen. Aus den Anwendungsfällen ergeben sich die Anforderungen an den zu entwickelnden Demonstrator, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Zur ebenen, freien und realistischen Fortbewegung in virtuellen Welten mittels des natürlichen Fortbewegungsmechanismus des Menschen (dem Gehen) muss ein geeignetes, intuitives Interaktionsgerät geschaffen werden.
- Zur Manipulation von Objekten muss ein geeigneter, intuitiver Interaktionsmechanismus geschaffen werden. Dabei muss die natürliche Interaktion des Menschen (die Manipulation mit der Hand) bedient werden.
- Die Prozesslogiken der Kommissionierung müssen in einem Simulationsmodell realistisch abgebildet werden können.
- Die virtuelle Abbildung der Kommissionierumgebung erfordert ein wirklichkeitsgetreues, dreidimensionales Geometriemodell der Umgebung.
- Der Simulator muss in der Lage sein, Simulations-/Analysedaten selbständig zu erfassen und zu protokollieren.
- Zum einfachen Erstellen und Auswerten von Simulationsversuchen müssen entsprechende Möglichkeiten vorgesehen werden.

Darüber hinaus sind allgemeine Anforderungen wie *Echtzeitfähigkeit*, *Sicherheit der Probanden*, *Einfache Bedienung des Simulators* sowie *Erweiterbarkeit und Flexibilität des Simulators* zur Umsetzung der Demonstrationsplattform zu erfüllen ([BOR-94], [ONG-04], [BOW-05]).

6.3 Aufbau und Komponenten der MI-Simulationsplattform

Zur Konzipierung der Simulatorplattform basierend auf den Anforderungen müssen geeignete Komponenten zur Umsetzung zur Verfügung stehen. Dies umfasst die Systeme der Virtuellen Realität insbesondere der Interaktionsgeräte und der einzusetzenden Teilsysteme (Hard- und Software). Bei der Auswahl des geeigneten Projektionssystems wie auch bei den verbleibenden Komponenten müssen folgende Abschätzungen an die Anwendung durchgeführt werden ([ICI-08], [BOR-94], [BOW-05]).

- Welche Skalierung der Objekte soll gewählt werden? (Mikro, 1:1, Makro)

- Sollen reale menschliche Bewegungen/Interaktionen auf der Basis des digitalen Modells untersucht werden?
- Wie groß soll der immersive Bewegungsraum des Benutzers in der virtuellen Umgebung sein?

Nachfolgende Abbildung zeigt die Bewertung verschiedener Projektionssysteme. Zur Umsetzung der Plattform steht am Institut eine Powerwall mit einer Projektionsdimension von 3 x 2 m zur Verfügung. Das System arbeitet nach dem Polarisationsverfahren mit einer Rückprojektion und einer Auflösung von 1400x1050 Pixel. Wie die Bewertung zeigt, sind Powerwall-Systeme gut zur realitätsnahen Simulation menschlicher Aktivitäten durch den Nutzer in einer 1:1 skalierten Umgebung geeignet. Die besten Leistungsmerkmale besitzen CAVE-Systeme, sind aber aus Kostengründen kaum realisierbar.

		CAVE	Power-wall	Benches	HMD
Skalierung	Mikro	+	o	+	+
	1:1	++	+	o	+
	Makro	++	++	-	+
Simulation menschlicher Aktivitäten durch den Nutzer		++	+	o	+
Immersion des Benutzers in der VR		++	+	--	+
Legende: -- nicht möglich / - nicht passend / o möglich / + passend / ++ sehr passend					

Tabelle 6-1: Bewertung unterschiedlicher Projektionssysteme [ICI-08]

Während der Grad der Immersion sehr stark durch das Projektionssystem bestimmt wird, ist der Grad der Interaktion von den eingesetzten Interaktionstechniken abhängig. Zur Interaktion des Nutzers in der virtuellen Umgebung ist ein Trackingsystem unabdingbar. Hierzu wird das installierte optische Positionserfassungssystem der Powerwall verwendet. Um den Nutzer die Möglichkeit zu bieten, realistisch in der virtuellen Realität zu agieren, bedarf es jedoch spezieller Interaktionsmechanismen bzw. -metaphern. Der Schwerpunkt der Simulatorplattform liegt auf der interaktiven Evaluierung eines virtuellen Modells im Kontext räumlicher Aufgabenstellungen. Zur Erfüllung der Anforderungen der ebenen, freien Navigation soll ein Laufband entsprechend adaptiert werden, das das Gehen auf der Stelle ermöglicht. Die Interaktion mit den Objekten der Virtuellen Realität wird mit Hilfe eines Datenhandschuhs

umgesetzt, der mittels entsprechender Sensorik in der Lage ist, Gesten zu erkennen. Systeme wie 3D-Mäuse, Flysticks, Sprachsteuerungen etc. werden zur Verwirklichung der Plattform auf Grund der weniger realistischen Interaktionsmöglichkeiten nicht in Betracht gezogen.

Die softwaremäßige Umsetzung erfolgt auf einem Windows XP 32 Bit Betriebssystem, wobei der spätere Umstieg auf die leistungsfähigere 64 Bit Variante denkbar ist, sofern die Hardware dies zulässt. Dabei wird auf die Virtual Reality Software Visual Decision Plattform 2006 SP2 (VDP) des Unternehmens ICIDO zurückgegriffen. Die VDP-Software ist ein leistungsstarkes, clusterfähiges Paket, das alle Anforderungen zur Umsetzung eines immersiven Systems erfüllt. Vor allem die auf C++ basierende API (Application Programming Interface) stellt ein wichtiges Hilfsmittel zur Umsetzung der Simulatorplattform dar. Als zu Grunde liegende Hardware kommen leistungsfähige PC basierte Workstations mit Dual-Core Prozessoren und High-End Grafikkarten sowie 1 - 3 GB Arbeitsspeicher zum Einsatz, die über ein schnelles LAN Netzwerk (Local Area Network) miteinander kommunizieren.

Basierend auf den gewählten Komponenten wird der Gesamtaufbau der Simulationsplattform erstellt. Abbildung 6-5 zeigt das Konzept der Experimentierplattform, ruhend auf den Anforderungen. Eine detailliertere Konzipierung in punkto Interaktionsgeräte, Software und Simulationsmodell wird im folgenden Abschnitt erarbeitet.

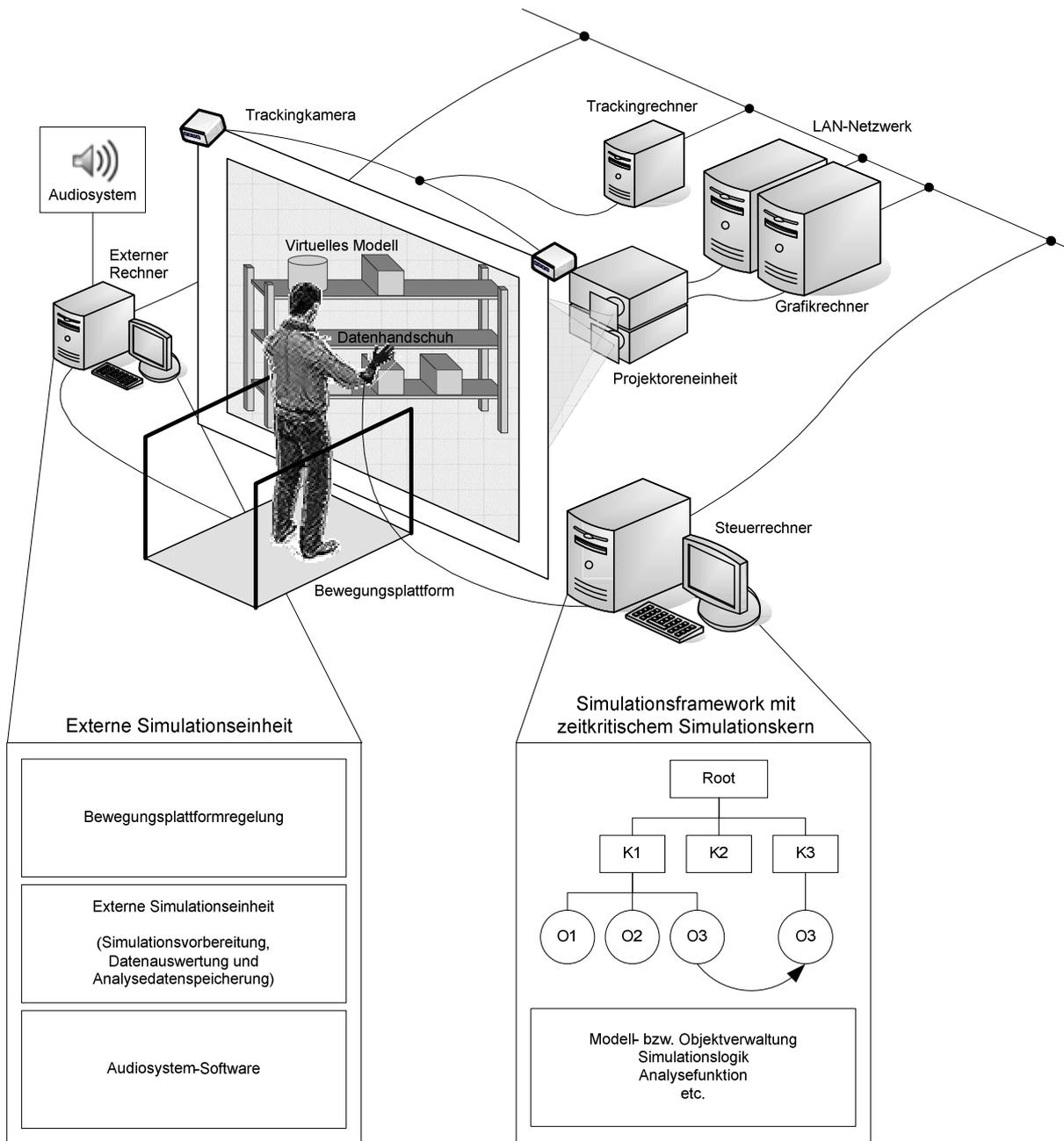


Abbildung 6-5: Konzept der Simulatorplattform

6.4 Interaktionsgeräte

Zur Realisierung der unterschiedlichen Interaktionsmetaphern müssen verschiedene Interaktionsgeräte in die Simulationsplattform integriert werden. Die wichtigsten sind hierbei eine Bewegungsplattform zur ebenen „freien“ Bewegung und ein Datenhandschuh zur Objektmanipulation. Diese werden zusätzlich zu dem bereits vorhandenen „Flystick“ und der Brille eingebunden.



Abbildung 6-6: Interaktionsgeräte der Simulationsplattform

Dabei ist insbesondere die Konzipierung einer Bewegungsplattform von Priorität, da diese ein wesentliches Element ist, das überhaupt erst eine realitätsnahe Interaktion des Menschen in der virtuellen Kommissionierumgebung ermöglicht. Nur wenn diese Plattform ein intuitives „Gehen“ gestattet, dann können realistische Kennzahlen ermittelt und der Mensch adäquat in die Simulationsumgebung integriert werden. Es wird daher angestrebt, eine einfache, regelbasierte Interaktionseinheit zu schaffen, die durch spezielle Mechanismen ein Fortbewegen in der Ebene ermöglicht. Zur Umsetzung der Experimentierplattform ist ein motorgesteuertes Laufband mit einer intuitiv zu bedienenden Richtungsänderungsfunktion unter Verwendung eines Tracking-Systems vorgesehen. Mit Hilfe des Tracking-Systems wird die Position des Benutzers auf dem Laufband bestimmt, die einem Regelalgorithmus zugeführt wird (siehe Abbildung 6-7). Die Motordrehzahl und damit die Geschwindigkeit gilt es als Stellgröße entsprechend zu steuern, sodass der Nutzer sich auf der Bewegungsplattform immer in einem vorgegebenen Bereich befindet. Die Vorgabe der Bewegungsrichtung erfolgt ebenfalls mittels des Positionserfassungssystems, indem die Drehung

des Kopfes mit der 3D-Brille um die Hochachse erfasst wird und entsprechend in eine Drehbewegung im virtuellen Raum mündet.

Daneben kommt ein auf das Einsatzszenario abgestimmter Datenhandschuh mit entsprechender Sensorik zur Interaktion mit virtuellen Objekten zum Einsatz, der über das Tracking-System in die Experimentierplattform integriert ist. Die Interaktionsgeräte sind letztlich über geeignete Schnittstellen in die Software eingebunden.

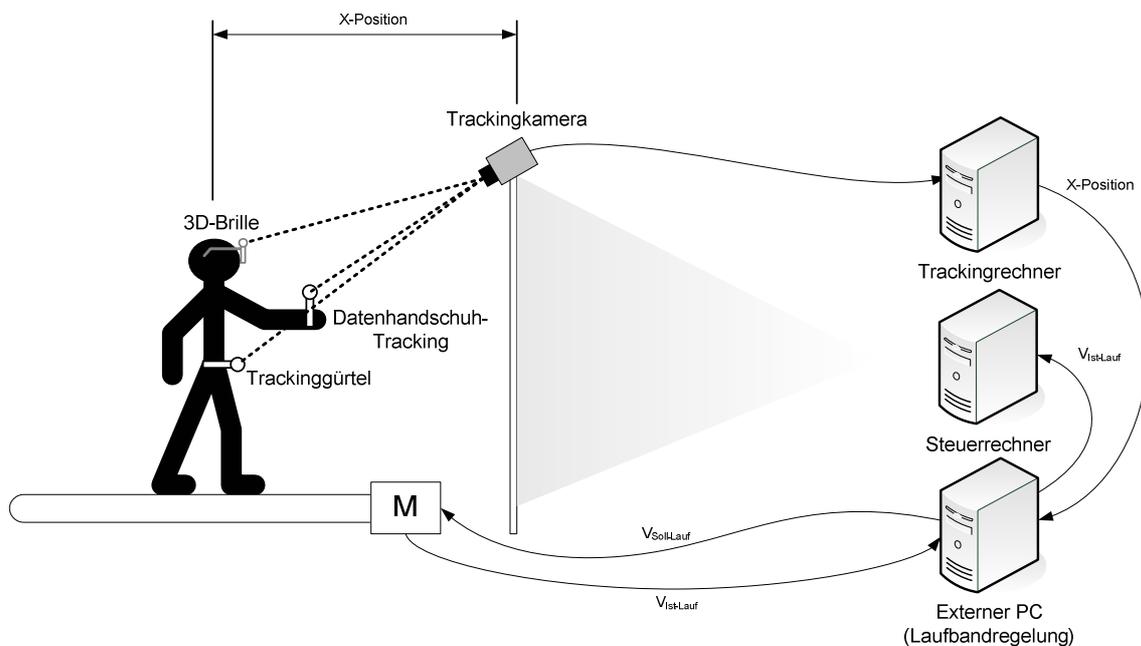


Abbildung 6-7: Prinzipskizze Interaktionsgeräte

6.4.1 Bewegungsplattform

Die Bewegungsplattform ist ein Laufband, auf dem sich der Benutzer „frei“ in der virtuellen Welt bewegen und mit ihr interagieren kann. Zur Realisierung der Bewegungseinheit wird auf ein computersteuerbares Laufband zurückgegriffen und entsprechend modifiziert. Das Gerät ist mit einem Gleichstrommotor mit 1,8 KW Leistung ausgestattet und kann sowohl über eine Bedienkonsole als auch eine serielle Schnittstelle gesteuert werden. Da das Laufband für den geplanten Verwendungszweck nur von einem Rechner aus angesteuert wird, dient die Bedienkonsole lediglich als Statusanzeige. Aus konstruktiver Sicht mussten Änderungen vorgenommen werden, um eine realitätsnahe Interaktion in der virtuellen Umgebung zu erlauben. Testläufe haben gezeigt, dass die Anordnung der Bedienkonsole mit entsprechendem Vorderbau für die Benutzung des Laufbandes im Virtual Reality System nicht sehr vorteilhaft ist, da das Sichtfeld des Benutzers und der Tracking Kameras beein-

trächtigt sind. Folglich ist eine einwandfreie Erfassung der Benutzerposition und damit eine kontrollierte Fortbewegung nicht möglich. Diese Einschränkungen erfordern die Entfernung des kompletten Vorderbaus mit Steuerungseinheit. Die Bedienkonsole ist unabhängig vom Laufband in einem eigenen Gehäuse untergebracht und über ein Datenkabel angebunden.

Aus Sicherheitsgründen muss gewährleistet sein, dass sich der Benutzer zu jedem Zeitpunkt festhalten kann. Eine eigens hierfür konstruierte auf einem Rahmen montierte Stützvorrichtung ist zu diesem Zweck am Gestell des Laufbandes befestigt. Die stabile Vorrichtung ist dezent so weit hinten angebracht, dass sie das Sichtfeld des Benutzers so wenig wie möglich beeinträchtigt, aber trotzdem in jeder Situation einen sicheren Halt ermöglicht. Eine weitere konstruktive Änderung befindet sich im Bereich des Antriebs. Die originale Abdeckung der Einheit behindert die Benutzung des vordersten Laufbandbereiches, vor allem beim Beschleunigen. Eine neue Abdeckung beseitigt dieses Problem und sorgt für mehr Trittfreiheit sowie einen adäquaten Schutz des Antriebes bzw. der Elektronik.



Abbildung 6-8: Bewegungsplattform

Zur problemslosen Benutzung der Bewegungsplattform musste ein Regelungssystem entwickelt werden, das dafür Sorge trägt, dass der Nutzer trotz seiner Fortbewegung quasi-stationär auf der Stelle am Laufband tritt bzw. im Falle eines Stopps die Laufbandgeschwindigkeit entsprechend auf null fährt. Grenzen werden der Regelung, die die Laufbandgeschwindigkeit dem Nutzer in Echtzeit anpassen muss, durch die Massenträgheit des Systems (Motor, Schwungscheibe etc.) gesetzt. Es gilt trotz dieser Parameter eine bestmögliche Nutzung des Interaktionsgerätes zu ermögli-

chen. Vor allem im Rahmen eines abrupten Stopps muss mittels eines Bremssystems eine sofortige Reduzierung der Laufbandgeschwindigkeit auf $v = 0$ möglich sein. Hierfür wird die in den Motor integrierte Lösebremse (diese ist im Ruhezustand durch Federn geschlossen) verwendet, die mittels eines Relais und einem am Rechner angebotenen USB-Steuergerät angesteuert wird.

Die Regelung des Laufbandes und damit die Steuerung der einzelnen Komponenten (Bremse, Motor etc.) erfolgt über einen eigens entwickelten Regelungsansatz, der in eine entsprechende Regelungssoftware umgesetzt wurde. Zur Kommunikation der einzelnen Geräte sind Softwareschnittstellen vorgesehen. Im vorliegenden Fall umfasst dies die Kommunikation zwischen Rechner und Laufband mittels einer seriellen RS232 Schnittstelle, die Kommunikation mit dem Steuergerät via USB und die Datenübertragung von der Regelungseinheit zum Virtual Reality Steuerrechner per LAN-Verbindung. Zudem müssen über eine LAN-Verbindung auch Trackingdaten zur Positionsbestimmung des Nutzers am Laufband abgefragt werden. Aufgabe der Software ist es, diese Daten zu verarbeiten und über die Schnittstellen die richtigen Steuerbefehle zur Regelung der Plattform weiterzugeben.

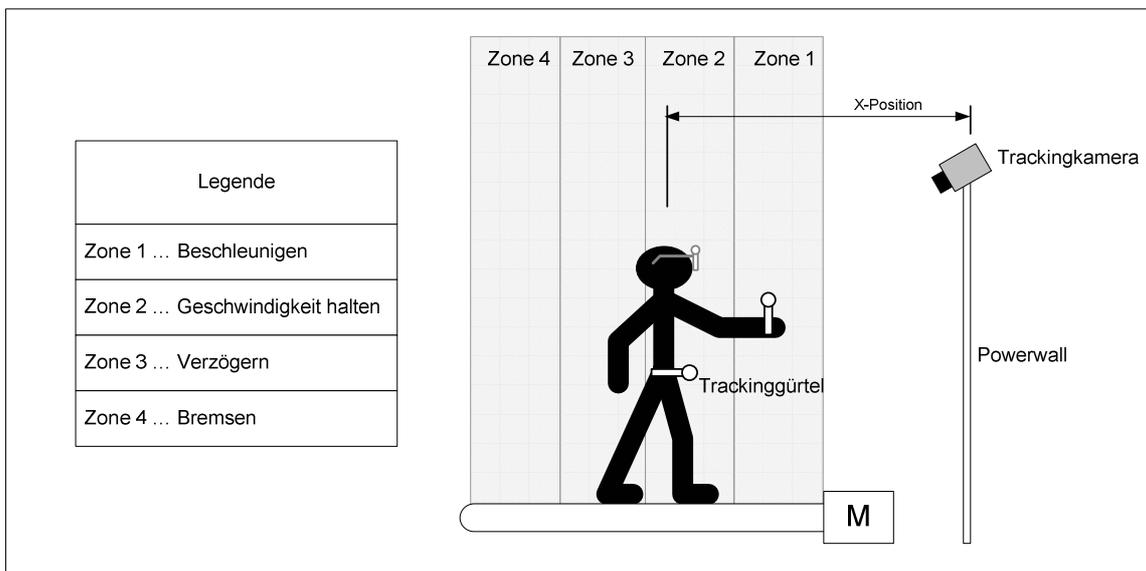


Abbildung 6-9: Regelung mittels Zonen

Die Regelung basiert auf einem einfachen aber, wie sich in späteren Tests herausgestellt hat, wirkungsvollen Algorithmus. Dieser sieht die Unterteilung des gesamten Laufbandes in unterschiedliche Zonen vor, die durch die jeweiligen Grenzwerte definiert sind (siehe Abbildung 6-9). Durch das Trackingsystem wird erfasst, in welcher Zone sich der Benutzer aktuell befindet, woraufhin entsprechende Aktionen der Re-

gelung eingeleitet werden. Befindet sich der Benutzer beispielsweise in der ersten Zone, so wird das Laufband sukzessive beschleunigt, wobei aus Sicherheitsgründen die Maximalgeschwindigkeit des Laufbandes in der Software auf 4 km/h begrenzt ist. Zudem ist denkbar, dass die unterschiedlichen Zonen mit einem Intensivitätsgradienten versehen werden, der bestimmt, in welchem Bereich einer Zone wie intensiv beschleunigt bzw. verzögert wird. Über eine Bedienoberfläche ist es möglich, Regelungsparameter zu verändern. Die Definition der Zonen kann so zur Laufzeit verändert und die Regelung somit optimal abgestimmt werden.

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Regelungsschema nach dem die Bewegungsplattform geregelt wird.

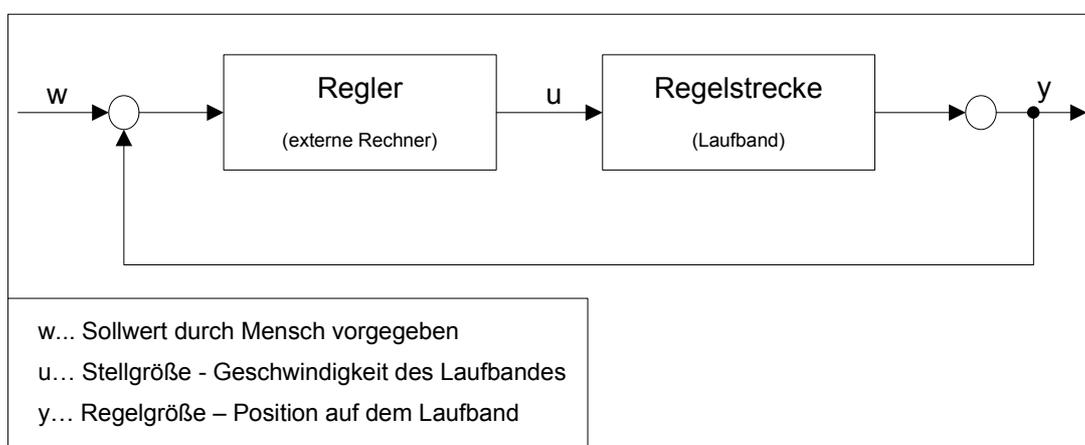


Abbildung 6-10: Regelungsschema der Bewegungsplattform

Als Regelgröße für diese Regelung wird die Position (y) des Benutzers auf dem Laufband verwendet. Diese wird mit Hilfe des Trackingsystems und einem Gürtel mit Markern ermittelt. Der Laufbandrechner bestimmt aus der momentanen Geschwindigkeit und der Position des Benutzers mit Hilfe des zonenbasierten Algorithmus die Stellgröße (u) und sendet diese über die Schnittstelle zum Laufband. Parallel dazu wird der Geschwindigkeitswert per Netzwerk an den Steuerrechner übermittelt und dort in eine Bewegung in der virtuellen Welt umgesetzt. Der Sollwert für die Regelung (Zone auf dem Laufband, an der der Mensch quasi-stationär gehalten werden soll) der Bewegungsplattform wird vom Menschen über die Bedienoberfläche am Regelungsprogramm vorgegeben.

Zur Navigation durch den virtuellen Raum wird zusätzlich zum Laufband das Head-Tracking verwendet. Dabei wird die Drehung des Kopfes in eine Drehbewegung in der virtuellen Umgebung umgewandelt. Diese Funktionalität ist im Simulationsframework am Steuerrechner implementiert, weshalb dies bei der Implementierung der

Laufbandregelung nicht zu berücksichtigen war. In Abbildung 6-11 ist die grafische Darstellung der Klassenstruktur, nach der die Implementierung erfolgt ist, dargestellt. Die Umsetzung erfolgt mit der objektorientierten Sprache C++ auf Basis des .NET Frameworks mit Hilfe des Visual Studio.NET 2003.

Die Namen der Klassen stehen jeweils im Kopf der dreiteiligen Einheiten. Im Mittelteil sind die Attribute der Klassen aufgeführt, gefolgt von den Methoden. Die Attribute sind Variablen einer Klasse, die in den Methoden, die auch als Funktionen verstanden werden können, verändert oder verwendet werden können. Bei den in Klammern stehenden Elementen der Methoden handelt es sich um Übergabeparameter. Dies sind Parameter, die der Funktion mitgeliefert werden müssen, damit die Funktion korrekt ausgeführt werden kann. Ebenso ist es möglich, von Methoden einen Rückgabewert zu erhalten, beispielsweise nach erfolgter Berechnung.

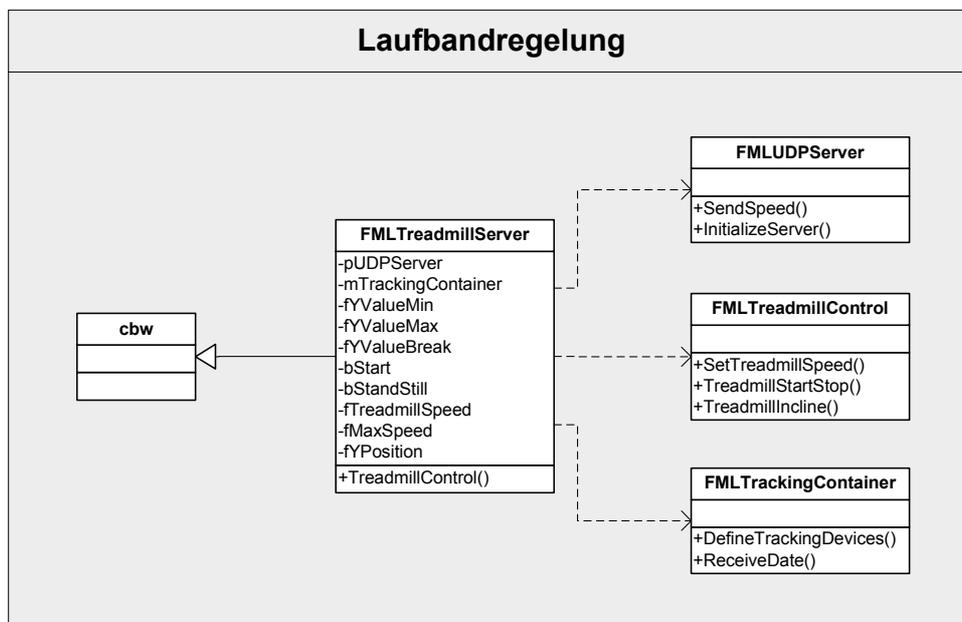


Abbildung 6-11: Klassendiagramm der Laufbandregelung

Die Klassen stehen untereinander in Beziehung, wodurch es möglich ist, auf Methoden bzw. Attribute einer Klasse zuzugreifen, sofern diese öffentlich zugänglich sind. Die Klassen **FMLUDPServer**, **FMLTrackingContainer**, **FMLTreadmillControl** und **cbw** stellen Methoden zur Kommunikation mit externen Komponenten zur Verfügung. **FMLTrackingContainer** liest die Tracking Daten des Positionserfassungssystems aus dem Netzwerk aus, während die Klasse **FMLUDPServer** eine Verbindung zum Steuerrechner initialisiert und Geschwindigkeitsdaten an diesen übermittelt. Die Klassen **FMLTreadmillControl** und **cbw** (vom Hersteller des Steuergerätes zur Verfügung gestellt) ermöglichen die Kommunikation mit den Komponenten des Laufbandes zur

Steuerung des Antriebes und der Bremsfunktion. Der Regelungsalgorithmus selbst ist in der Klasse FMLTreadmillServer implementiert und greift entsprechend auf die verbleibenden Klassen zu, um die entsprechenden Aktionen auszulösen. Der Algorithmus wird mittels einer Timer-Funktion alle 10 ms durchlaufen und ein entsprechendes Update des Laufbandes veranlasst. Die Funktionen des FMLUDPServer werden in einem eigenen Thread verpackt und abgearbeitet. Das heißt, dass Funktionen dieser Klasse in einem eigenen Prozess quasi-parallel zu den restlichen Funktionen ausgeführt werden. Dieses auch als Multithreading bezeichnete Konzept ist vor allem bei Netzwerkverbindungen notwendig, da diese die korrekte Abarbeitung anderer Funktionen behindern können, sofern diese sich im gleichen Thread befinden.

6.4.2 Datenhandschuh

Zur Manipulation der Objekte in der virtuellen Umgebung wird ein Datenhandschuh mit Dehnungsmessstreifen der Firma 5DT eingesetzt. Über die Messstreifen wird die Krümmung der Finger bestimmt, die letztlich Aufschluss über die Gestiken des Nutzers geben. Mittels der mit dem Datenhandschuh mitgelieferten Treiber kann der Handschuh in entsprechende Anwendungen integriert werden. Die Erfassung der Position der Hand im Raum muss mit Hilfe des Trackingsystems realisiert werden. Dazu wird der Datenhandschuh mit passenden Marken versehen (siehe Abbildung 6-12) und anschließend dem Trackingsystem angelernt. Alle relevanten Zustandsinformationen stehen dadurch zur Verfügung und der Datenhandschuh kann direkt an den Simulator angebunden werden.

Auf einen Force-Feedback-Datenhandschuh zur Umsetzung der Plattform wird vorerst verzichtet, da eine Krafrückkopplung für den Anwendungsfall der Kommissionierung eine geringe Bedeutung besitzt. Primär muss eine Objektmanipulation im Sinne einer Ortsveränderung (Objekt aufnehmen und ablegen) möglich sein, wobei eine präzise Manipulation mit haptischer Rückmeldung ebenso wenig gefordert ist wie eine exakte physikalische Simulation der Objekteigenschaften.

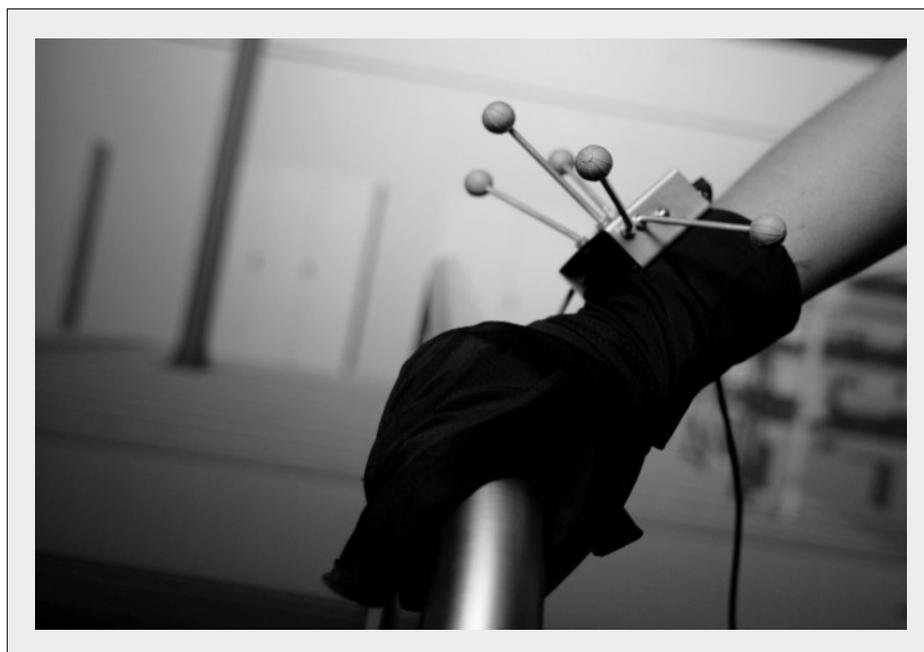


Abbildung 6-12: Datenhandschuh mit Marken

Der Greifvorgang wird in der Simulation mittels eines gestenbasierten Modells mit vorgeschalteter Kollisionsrechnung realisiert. Ein Griffereignis findet statt, wenn eine Griffpose der Hand identifiziert wird und sich ein passendes greifbares Objekt innerhalb dieser Pose befindet. Durch die wenig rechenaufwendige Kontrolle auf Überschneidungen der Bounding-Spheres (kugelförmige Hüllen) der einzelnen virtuellen Objekte kann im Rahmen einer Bounding-Sphere Collision Detection (siehe Abbildung 6-13) festgestellt werden, ob eine Kollision vorliegt [GAM-08]. Die Kollision bestimmt beim Greifvorgang letztlich, welcher Gegenstand gepickt wird. Werden mehrere Kollisionen registriert, so wird jenes Objekt aufgenommen, bei dem die größte Überschneidung festzustellen ist.

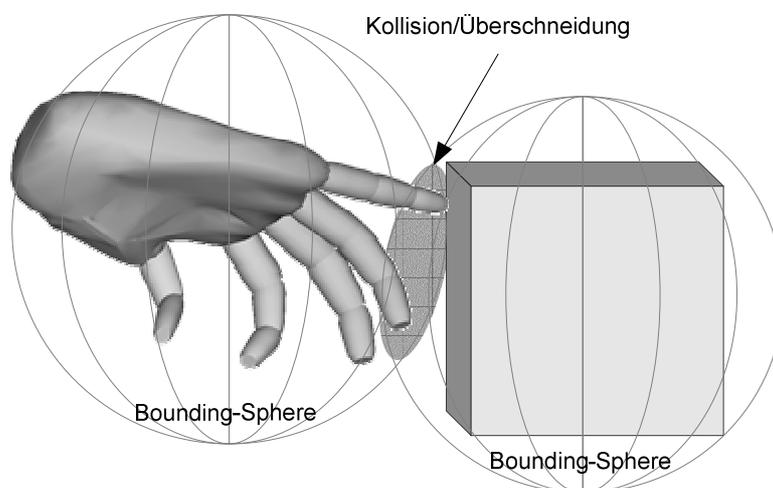


Abbildung 6-13: Kollisionserkennung mittels Bounding-Spheres

Das gewählte Verfahren zur Abbildung des Greifvorganges stellt ein Optimum für das vorliegende Anwendungsszenario dar. Zum einen ist damit im Gegensatz zu physikbasierten Simulationen ein weniger rechenintensives Verfahren gewählt worden, was für die Echtzeitfähigkeit von Vorteil ist. Zum anderen ist eine exakte physikalische Abbildung des Greifens ein übertriebenes für den Fall der Kommissionierung nicht gefordertes Umsetzungsmodell, da hier primär das Picken der Objekte im Vordergrund steht und nicht die exakte Objektmanipulation wie beispielsweise im Falle eines Montagevorganges.

6.5 Das 3D-Simulationsmodell

Wichtiger im Konzept zu berücksichtigender Bestandteil der Experimentierplattform ist die Strukturierung bzw. der Aufbau des dreidimensionalen Simulationsmodells. Prinzipiell ist auf eine detaillierte aber unter dem Gesichtspunkt der Datenmenge und Strukturierung effiziente Modellierung zu achten. Besonders wichtig ist das 3D-Simulationsmodell in Hinblick auf die zu implementierende Kommissionierlogik, da das Modell quasi die Schnittstelle zwischen Software/Simulationslogik und Interaktionsgeräte/Nutzer darstellt. Deshalb müssen bestimmte Objekthierarchien und Objektstrukturen umgesetzt werden.

Das Simulationsmodell wird in eine eventabhängige und eventunabhängige Struktur untergliedert. Eventabhängig ist eine Struktur, wenn sie im Rahmen der Ablauflogik eine wesentliche Rolle spielt und wie der Name bereits andeutet Events auslöst oder von Events beeinflusst wird. Diese Modelle sind bei der Modellierung in einem 3D-System mit besonderen Merkmalen auszustatten. Äußerst wichtig ist es, den 3D-Objekten einen eindeutigen Identifizierungsnamen zuzuordnen, damit diese vom Simulationskern erkannt und mit Attributen (z.B. Kollisionssensoren) versehen werden können. Zusätzlich kann noch in statische und dynamische Struktur unterschieden werden. Statische Strukturen sind ortsfest im Simulationsmodell verankert und haben nur Sensoren, während dynamische Strukturen neben Sensoren auch über Aktoren zur gezielten Bewegung bestimmter Geometrien innerhalb des Modells verfügen.

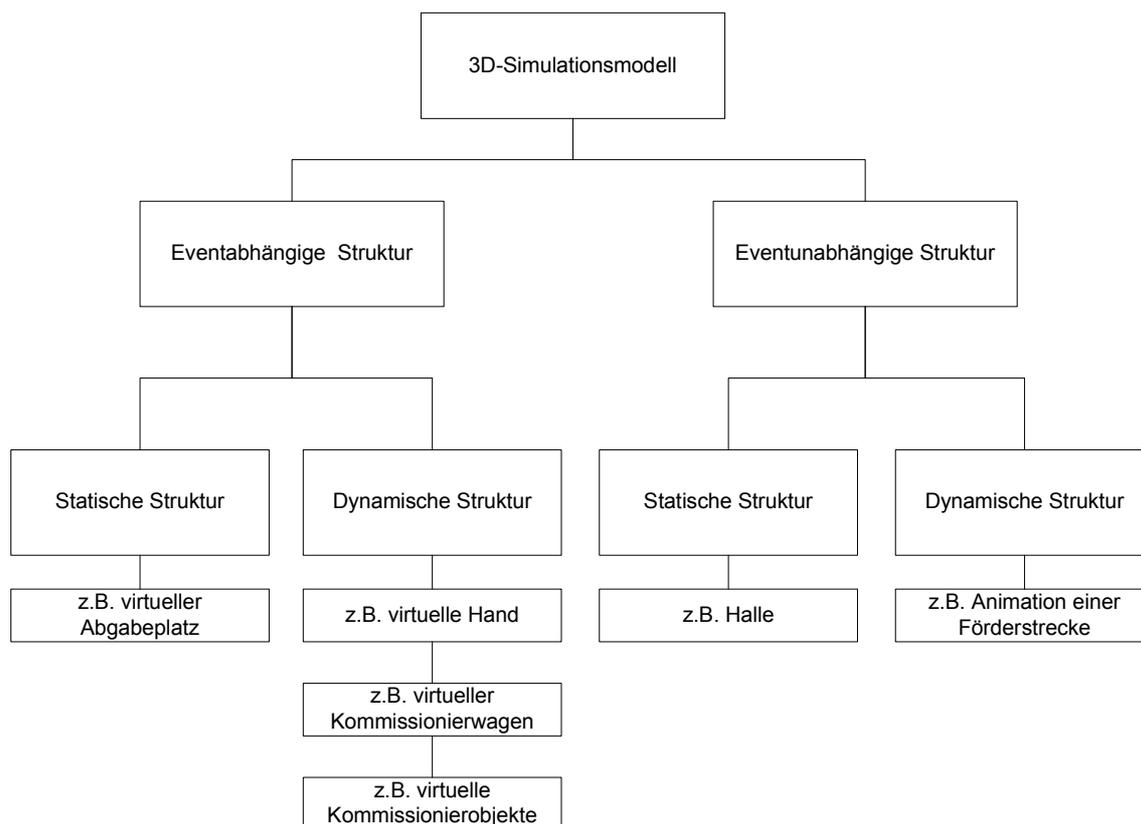


Abbildung 6-14: Struktur des 3D-Simulationsmodells

Eventunabhängige Strukturen hingegen werden weder mit Sensoren noch mit Aktoren versehen. Diese sind lediglich zur Steigerung des Realitätsempfindens in das Modell integriert. In Form von dynamischen Strukturen können hierbei Animationen ebenfalls zur Realitätssteigerung eingebunden werden.

Bei der Modellerstellung ist es notwendig, bestimmte Konventionen bei der Bezeichnung der entsprechenden Objekte einzuhalten, um eventabhängige- bzw. eventunabhängige Strukturen voneinander zu unterscheiden. Bei der Konzipierung des Simulators ist hierzu eine Bezeichnungskonvention entstanden, die es bei der 3D Modellerstellung zu berücksichtigen gilt. Folgende Identifikationsbezeichner sind für eventabhängige Strukturen vorgesehen:

- **POBJXXX**: Dieser Bezeichner steht für PickableOBjects, also für Objekte, die gepickt bzw. kommissioniert werden können. Die letzten drei Stellen sind Platzhalter für eine dreistellige ID-Nummer. Damit können 1000 Objekte als mögliche zu kommissionierende Objekte deklariert werden. Bei der Initialisierung der Simulation werden diese Objekte im Szenegraphen gesucht und mit entsprechenden Zusatzattributen (z.B. Kollisionssensoren) versehen.

- **TERMINAL:** Dieses Element des 3D-Modells stellt die Station zur Annahme von Kommissionieraufträgen dar und wird ebenfalls mit einem Kollisionssensor versehen.
- **DELIVERY:** Diese bezeichnet die Abgabestation, an der Kommissionieraufträge abgeschlossen werden können.
- **TROLLEY:** Dies bezeichnet den virtuellen Kommissionierwagen, der mit einem Aktor zur Bewegung im virtuellen Raum und mit einem Kollisionssensor versehen wird.
- **HAND:** Die virtuelle Repräsentation der Hand und deren Finger müssen ebenfalls eindeutig identifizierbar sein und dementsprechend mit Sensoren/Aktoren versehen werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Repräsentation der virtuellen Hand mit ihren Aktoren und einem Sensor. Die Aktoren werden benötigt, um die Finger bzw. die gesamte virtuelle Hand mittels Datenhandschuh zu steuern. Der kugelförmige Kollisionssensor (Bounding-Sphere) dient der Erkennung von Kollisionen zwischen virtueller Hand und anderen Objekten der virtuellen Welt, die ebenfalls mit einem Kollisionssensor ausgestattet sind. Dies geschieht durch ständige Überprüfung der Kugelsensoren bezüglich Überschneidungen untereinander.

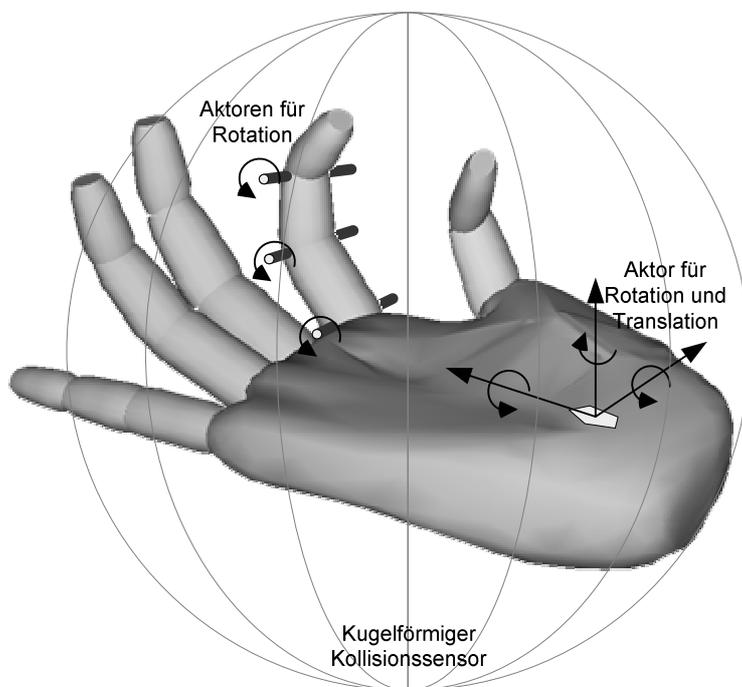


Abbildung 6-15: Virtuelle Hand mit Sensoren/Aktoren

In der Modellierung ist auf eindeutige Identifizierungsmöglichkeiten der Fingergelenke und der kompletten virtuellen Hand zu achten. Dadurch wird sichergestellt, dass die Hand mit entsprechenden Aktoren und Sensoren durch den Simulator versehen werden kann.

Zur Generierung eines dreidimensionalen Modells können verschiedene Systeme eingesetzt werden. Zum einen können dies CAD-Systeme, zum anderen spezielle Modellierungsumgebungen (z.B. Maya, 3D Studio Max etc.) sein. Prinzipiell ist es auch möglich, die unterschiedlichen Einzelmodelle aus den verschiedenen Modellierungsumgebungen über geeignete Schnittstellen zu einem Gesamtmodell zusammenzuführen. Als Datenaustauschformat können hierfür gängige Standards wie IGES, VRML etc. eingesetzt werden. Diese Formate sind notwendig, um bereits existierende 3D-Modelle weiterverwenden zu können. Notwendig wird dies durch Unterschiede in den Modellierungssystemen, die auf Grund der verschiedenen Aufgabenstellungen Modelldaten in unterschiedlichster Art und Weise beschreiben. Im CAD-System beispielsweise liegt der Fokus auf der mathematisch exakten Beschreibung von CAD-Primitiven. Bestimmte Informationen dieser Primitive, zusammengefasst in verschiedene Datensätze, bilden die Objekte/Knoten, auf denen der Anwendungsfokus in einer Virtual Reality Anwendung liegt. Die Art und Weise wie die Zusammenfassung der Datensätze erfolgt, bestimmt die hierarchische Strukturierung einer virtuellen Szene.

Aus den mathematisch exakt beschriebenen CAD-Primitiven müssen Polygonmodelle erzeugt werden. Diese stellen eine Approximation der exakt beschriebenen CAD-Geometrie durch Dreiecksnetze dar. Für die Erzeugung dieser Modelle stehen verschiedenste Tesselierungswerkzeuge zur Verfügung, die vollautomatisch diesen Prozess unterstützen. Das Ergebnis dieser Tesselierungen wird in Standarddateiformate wie Inventor oder VRML (Virtual Reality Modelling Language) exportiert. Ähnlich verhält sich dies bei speziellen Modellierungsumgebungen wie beispielsweise 3D-Studio Max, das 3D Modelle rechnerintern exakt mathematisch abbildet und diese über entsprechende Tesselierungsvorgänge in das VRML-Format exportieren kann. In der vorliegenden Arbeit wurde auf das leistungsstarke Modellierungswerkzeug 3D Studio Max zurückgegriffen (siehe Abbildung 6-16).

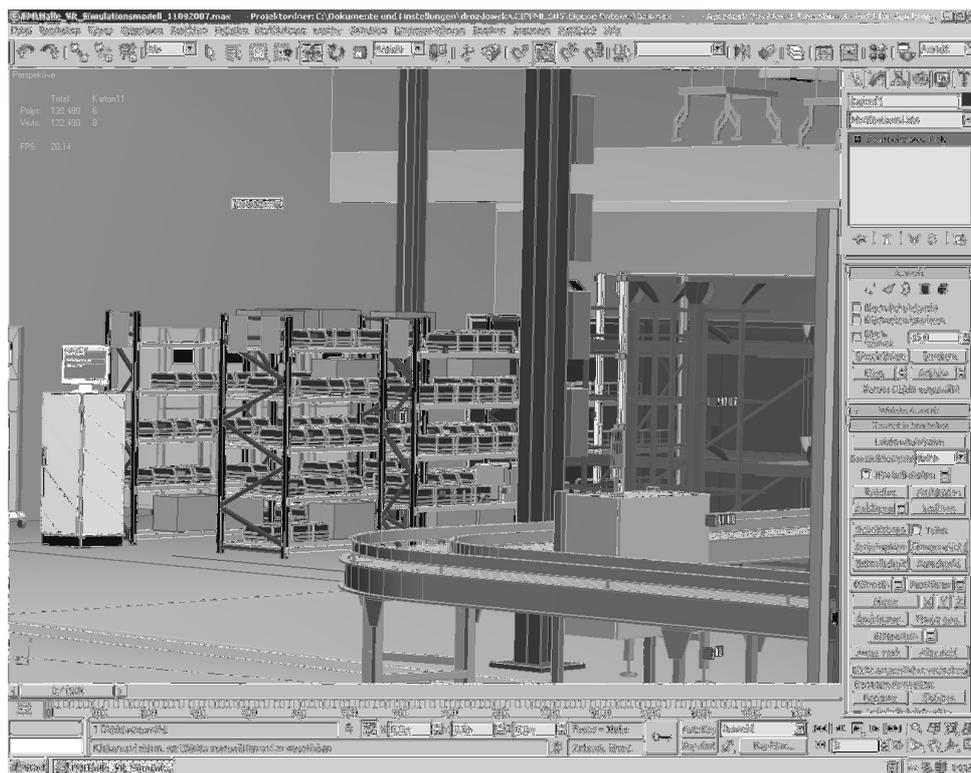


Abbildung 6-16: 3D Studio Max mit Modell

Wichtig beim Export ist, dass die Polygonmengen auf Basis der Strukturierung im Ursprungssystem hierarchisch in einem Baum durch Knoten angeordnet werden. Somit erfolgt eine Strukturierung des Modells, das später in der Virtual Reality zum Einsatz kommt und sich im Szenengraph widerspiegelt. Diese Struktur ist für die Umsetzung der Interaktionsmechanismen von großer Bedeutung. So ist das Simulationsframework, das nach bestimmten Regeln deklarierte Objekte/Knoten in einer hierarchischen Struktur mittels bestimmter Suchoperationen ausfindig machen kann, in der Lage, diese mit entsprechenden Eigenschaften (z.B. Kollisionsattributen) zu versehen und so laufend auf bestimmte Events hin zu überwachen. Objekte werden auf diese Art und Weise z.B. selektierbar, respektive greifbar gemacht.

Die erzeugten Polygonmodelle können mit weiteren visuellen Attributen versehen werden. Das wichtigste zusätzliche Attribut, das einem Objekt zusätzlich angehängt werden kann, sind so genannte Texturierungen. Diese erhöhen den Realitätsgrad drastisch, da sie wirklichkeitsnah wirkende Oberflächendarstellungen erlauben. So kann beispielsweise auf einen Boden eine Betonstruktur aufgebracht werden.

Ergebnis der Modellerzeugung sind Geometriemodelle, die einzelne logische Objekte oder Baugruppen repräsentieren. Sie stehen als Polygonmodelle in einer definierten internen Strukturierung zur Verfügung und bilden den Grundbaustein einer virtuellen

Umgebung. In der Virtuellen Realität kann auf diese Struktur mit ihren Objekten zugegriffen und entsprechend dem Interaktionsmodell initialisiert werden.

6.6 Die MI-Simulation – Software

Ausgehend von den Interaktionsgeräten und dem 3D-Simulationsmodell erfolgen die Konzeption und das Design der Simulationssoftware, welche ein zentrales Element der MI-Simulation darstellt. Dabei wird auf die zur Verfügung stehende VR-Basissoftware (ICIDO - VDP 2006 SP2) zurückgegriffen und diese als Grundlage für die Konzeption des zu implementierenden Systems verwendet. Die Basissoftware (Systemkern) übernimmt dabei elementare Funktionen wie beispielsweise 3D-Rechenoperationen zur Visualisierung. Vorgesehen ist ein Framework, das mittels der API auf den Systemkern aufgesetzt wird und in das Module hinzugefügt und entfernt werden können, um die jeweilige Aufgabenstellung zu bearbeiten. Unter Framework wird hier ein objektorientiertes Code-Grundgerüst verstanden, das auf Grund des Aufbaus die entsprechenden Erweiterungsmöglichkeiten bietet und flexibel handhabbar ist. Das Framework übernimmt dabei grundlegende Aufgaben wie beispielsweise die Kommunikation mit externen Modulen oder die korrekte Anbindung an den Systemkern. Zur Nutzung der Plattform für Simulationszwecke wird das Framework um entsprechende Module mit den benötigten Funktionalitäten erweitert.

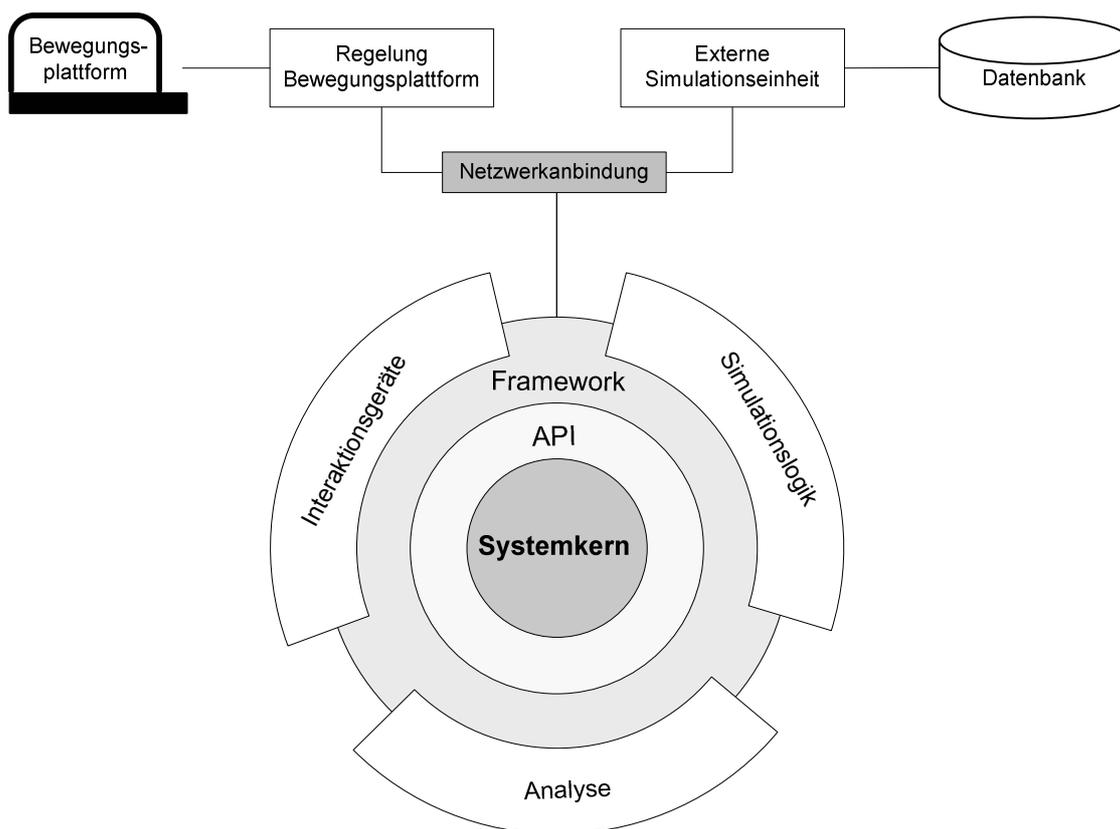


Abbildung 6-17: Softwarekonzept der Simulatorplattform

Im Zentrum des Softwarekonzepts steht der zeitkritische Systemkern. Auf Grund der Forderung an die Virtuelle Realität nach Echtzeitfähigkeit werden zeitintensive Vorgänge der Informationsverarbeitung (z.B. Datenbankbindung etc.) nicht auf den Kern aufgesetzt, sondern in externe Module ausgegliedert. Mittels der API (Application Programming Interface) werden dem Kern drei spezifische Module, die in ein Framework eingebettet sind, hinzugefügt. Diese umfasst das Modul Interaktionsgeräte zur Integration der Interaktionssysteme, das Modul Simulationslogik, um die Prozesse der Kommissionierung abzubilden und das Modul Analyse zur Erfassung relevanter Daten während einer Simulation. Über eine entsprechende Netzwerkverbindung werden Daten mit den externen Modulen ausgetauscht. Die externen Module übernehmen die aus dem Framework ausgelagerten Tätigkeiten, wodurch sichergestellt wird, dass genügend Rechenkapazitäten zur Echtzeitsimulation zur Verfügung stehen. Dies ist zum einen die Regelung der Bewegungsplattform und zum anderen eine Externe Simulationseinheit, die wichtige Daten für die Simulation verwaltet, diese speichert und auch in Form unterschiedlicher Analysefunktionen auswertet. Die Ablage der Daten erfolgt in einer Datenbank, die an die Externe Simulationseinheit angebunden ist. Darin sind relevante Informationen zur Simulationsdurchführung

(z.B. Kommissionieraufträge) sowie die Daten bzw. Ergebnisse der Analyse abgelegt. Die Externe Simulationseinheit ist überdies auch als Hilfsmittel zur Vorbereitung bzw. zur Auswertung einer Simulation gedacht. Im Rahmen der Vorbereitung ist es möglich, unterschiedliche Auftragsszenarien schnell und einfach über eine entsprechende GUI (Graphical User Interface) zu konfigurieren, die anschließend in der Simulation vom Probanden abgearbeitet werden müssen. Zur transparenten Ablage der Analysedaten können diese gezielt benannt und gespeichert werden. Ausgewertet werden die Simulationsversuche ebenfalls mit Unterstützung der Externen Simulationseinheit, z.B. in Form von Durchschnittswertberechnungen und Balkendiagrammen bezogen auf die Probanden bzw. Auftragsszenarien.

6.6.1 Das MI-Simulationsframework

Als besonders wichtiger Punkt stellt sich die Gesamtintegration der Plattform heraus. Diese Aufgabe übernimmt das Simulationsframework, das elementarer Bestandteil der Plattform ist und die Möglichkeit bietet, Module zur Simulation beliebig einzusetzen bzw. zu entfernen. Wichtigste Aufgabe des Frameworks ist es, die in den Modulen implementierten Routinen in die standardmäßig vom Virtual Reality System durchgeführte Simulationsschleife (Abbildung 6-18 links) zu integrieren. Rechts in der Abbildung 6-18 wird gezeigt, wie die Simulationsschleife nach der Erweiterung um entsprechende Routinen zur Durchführung der Kommissioniersystemsimulation aussehen soll. Dabei wird neben zusätzlichen Initialisierungsroutinen die Simulationsschleife um drei wesentliche Routinen, die in den Modulen Interaktionsgeräte und Simulationslogik zu finden sind, erweitert. Diese enthalten spezifische Funktionalitäten, die für den aktuellen Frame/Simulationszyklus durchlaufen werden. Dadurch wird der momentane Zustand der Simulation bzw. der virtuellen Objekte basierend auf den Interaktionsgeräteeingaben (Datenhandschuh etc.) und der gegebenen Simulationslogik jedes Mal neu errechnet. Abschließend erfolgt das Rendering der Szene unter Einbeziehung der bereits durchgeführten Zustandsaktualisierung, bevor die Simulationsschleife von neuem durchlaufen wird.

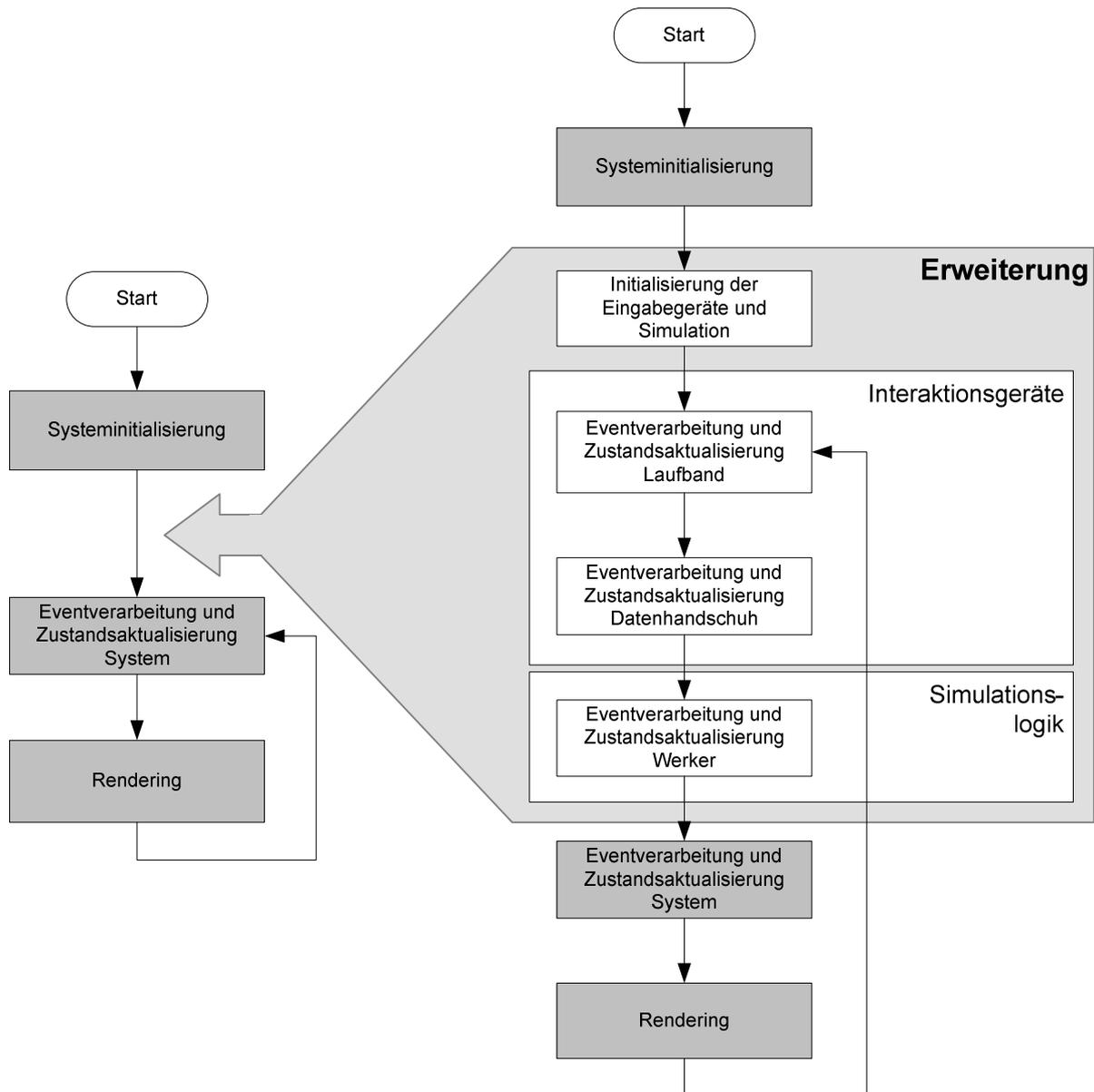


Abbildung 6-18: Simulationsschleife und erweiterte Simulationsschleife

Das Framework wurde auf Basis der API des Virtual Reality Systems in C++ in MS Visual Studio 2003 umgesetzt. Nachfolgende Abbildung zeigt die Klassenstruktur des Frameworks mit den integrierten Modulen (grau hinterlegt) und deren Klassen.

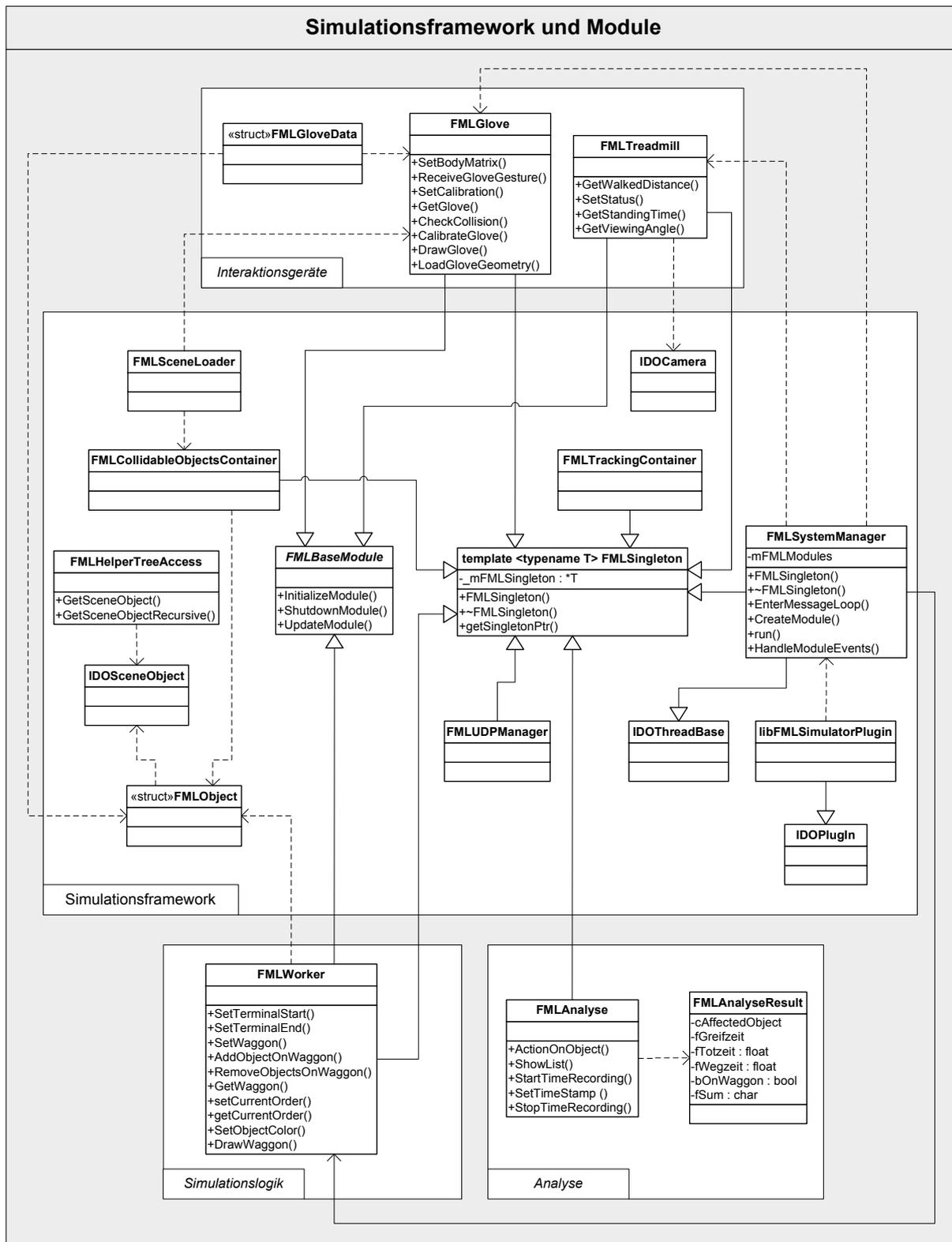


Abbildung 6-19: Klassendiagramm des Simulationskernes

Im Mittelpunkt steht der FMLSystemManager, in dem alle Klassen der Module verankert und registriert sind. Über die Klasse IDOThreadBase, die von der API zur Verfügung gestellt wird, sorgt der FMLSystemManager für die Integration der Module in

die Simulationsschleife der Software. Die einzelnen Module bzw. deren Klassen werden dabei von der Basisklasse FMLBaseModule abgeleitet, die vordefinierte Datenstrukturen und Methoden beinhaltet und diese entsprechend weitervererbt. In der abgeleiteten Klasse wird durch überschreiben der vorhandenen Methoden bzw. durch hinzufügen neuer Methoden/Datenstrukturen eine neue Klasse zur Modulgenerierung implementiert. Im vorliegenden Fall sind insbesondere die Methoden Initialize, ShutDown und Update mit den jeweils notwendigen Code-Segmenten zu überschreiben bzw. zu erweitern. Die Initialize-Methoden werden beim Start des Simulators und die ShutDown-Methoden beim Beenden der Simulation aufgerufen, während die Update-Methode bei jedem Durchlauf der Simulationsschleife abgearbeitet wird. Das Überschreiben der Update-Methoden legt somit im Wesentlichen die Funktionen der MI-Simulation fest. So wird beispielsweise in der FMLTreadmill Klasse stets (in jedem Simulationszyklus einmal) die aktuelle Benutzerposition im virtuellen Modell auf Basis der Laufbanddaten berechnet, die anschließend dem Rendering-Prozess zur Visualisierung zugeführt wird.

Weiteres wichtiges Merkmal des Simulationsframeworks ist das implementierte Singleton-Muster FMLSingleton. Dieses stellt sicher, dass nur eine Instanz eines Objektes von einer bestimmten Klasse existieren kann. So lassen sich beispielsweise vom FMLSystemManager nicht mehrere Objekte erzeugen. Dies ist sinnvoll, da es nur eine zentrale Verwaltungsstelle innerhalb des Frameworks geben kann. Etwa genauso verhält es sich mit der Klasse FMLTreadmill, da es sinnvollerweise nur eine Steuerungsinstanz zur Steuerung der Betrachterposition geben sollte.

Neben diesen Umsetzungsstrukturen und Implementierungsmustern stehen im Framework einige Hilfsklassen zur Unterstützung der Simulation zur Verfügung, die im Folgenden aufgelistet sind.

- Klasse FMLHelperTreeAccess: Diese Klasse beinhaltet Funktionen zur Traversierung des Szenegraphen. Dabei wird jeder Knoten in der Baumstruktur des Graphen durchsucht, um dessen Eigenschaften abzurufen bzw. festzulegen. Auf diese Art und Weise kann z.B. nach Objekten gesucht und diese mit speziellen Attributen zur Kollisionsüberwachung versehen werden.
- Klasse FMLSceneLoader: Dient zum Laden dreidimensionaler Geometrien (z.B. Simulationsszene oder virtuelle Hand)

- Klasse FMLCollidableObjectsContainer: Alle Objekte, die auf Kollisions-Events hin überwacht werden müssen, werden von dieser Klasse verwaltet.
- Klasse FMLUDPManager: Diese Klasse dient zum Handling der Kommunikation/Netzwerkverbindungen mit externen Simulationsmodulen.

Nachfolgender Abschnitt soll die einzelnen Module (Interaktionsgeräte, Simulationslogik, Analyse) mit ihren Klassen, Funktionalitäten und Abläufen genauer beschreiben. Zuvor ist es jedoch wichtig, die Initialisierungsroutinen zu kennen, da diese wichtige Merkmale für den weiteren Programmverlauf festlegen.

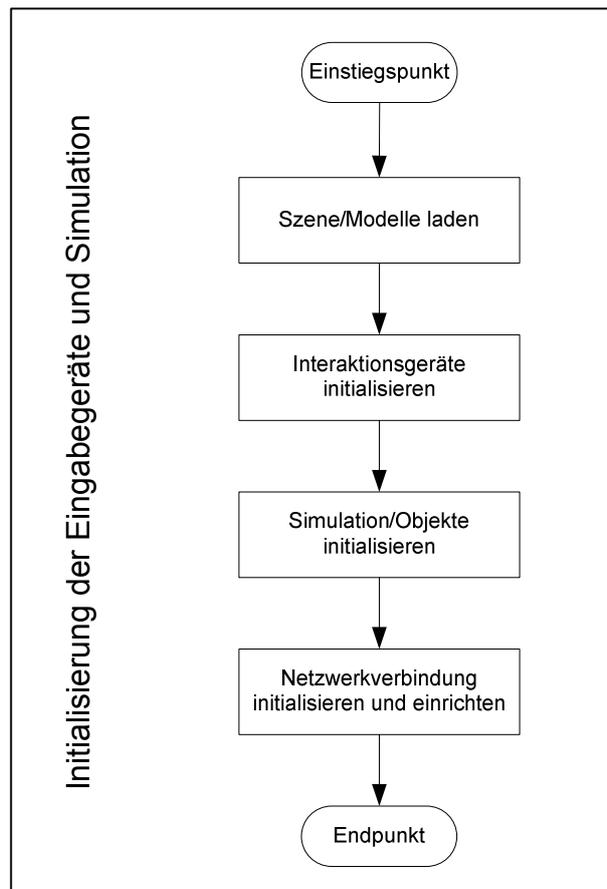


Abbildung 6-20: Ablaufdiagramm der Routinen bei der Initialisierung

Nach dem Start der Simulationsplattform wird in einem ersten Schritt die Szene, also das virtuelle Modell, geladen. Anschließend werden die Interaktionsgeräte initialisiert. Das System baut zuerst eine Verbindung zum USB-Port auf, an dem der Datenhandschuh angeschlossen ist und kalibriert diesen entsprechend. Nachfolgend wird eine Netzwerkverbindung zum Regelungsprogramm des Laufbandes eingerichtet, um die Geschwindigkeitsinformationen zu erhalten. Im weiteren Verlauf erfolgt die Initialisierung der Simulation. Dies bedeutet, dass der komplette Szenegraph des 3D-

Modells nach deklarierten Objekten mittels der FMLHelperTreeAccess Klasse durchsucht und diese mit für die Simulation wichtigen Zusatzattributen versieht. So wird unter anderem festgelegt, welche Objekte gepickt werden können. Der Simulator gibt diesen Gegenständen entsprechende Parameter mit (z.B. Kollisionssensoren). Letztlich wird noch eine Netzwerkverbindung zur Externen Simulationseinheit zum Austausch relevanter Simulations- bzw. Analysedaten eingerichtet. Anschließend tritt das System in die Simulationsschleife ein.

6.6.2 Das Modul Interaktionsgeräte

Zur freien, intuitiven Navigation in der virtuellen Kommissionierumgebung muss in Kombination mit der Bewegungsplattform eine Navigationsmöglichkeit in der vorliegenden Software geschaffen werden, die es im Simulationskern entsprechend zu berücksichtigen gilt. Hierzu wird der Anwender selbst ein Teil der virtuellen Umgebung und im einfachsten Fall durch ein so genanntes Kameraobjekt definiert, welches durch seine Position und Orientierung in der virtuellen Umgebung die Position und die Blickrichtung der Augen des Anwenders repräsentiert. Im Rahmen der Realisierung der Plattform wurde ein spezieller Navigationsmodus umgesetzt, der eine natürliche, intuitive Navigation in der virtuellen Umgebung zulässt.

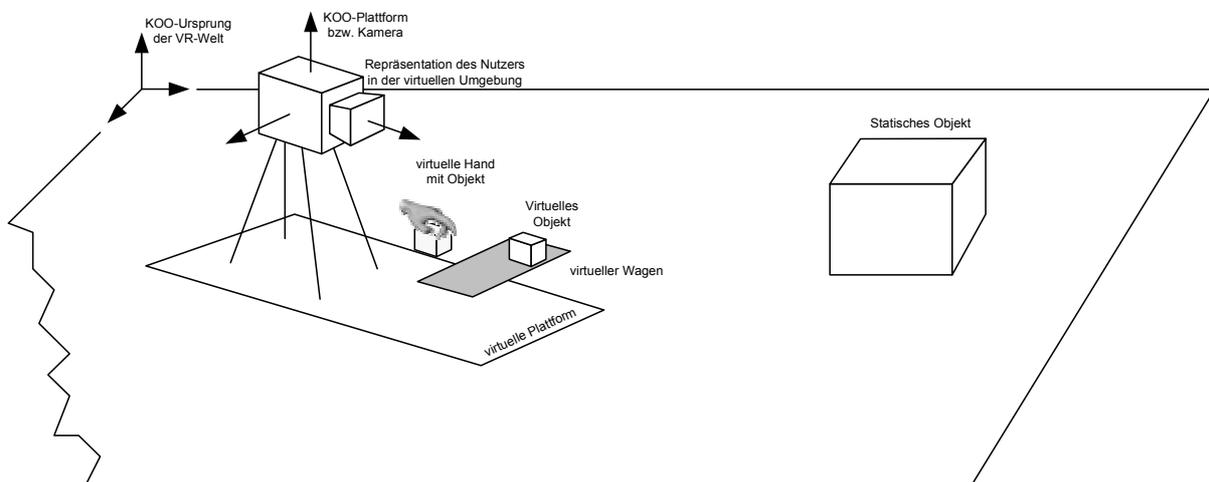


Abbildung 6-21: Navigationsmodell

Folgende Idee liegt diesem Mechanismus zugrunde: Die geometrische Repräsentation der rechten Hand und ein virtueller Kommissionierwagen bewegen sich auf einer gemeinsamen virtuellen „Plattform“ mit dem Kameraobjekt durch die Szene. Die virtuelle Plattform ist durch verschiedene Eingabegeräte ansteuerbar. Im vorliegenden Demonstrator wird die virtuelle Plattform von der Bewegungsplattform über die Geh-

geschwindigkeit und die Blickrichtung gesteuert. Relativ zur Plattform mit dem Kameraobjekt werden die geometrische Repräsentation der virtuellen Hand und der virtuelle Wagen positioniert.

Abbildung 6-22 zeigt die zum Modul Interaktionsgeräte zugehörige Klasse FMLTreadmill mit den darin implementierten Routinen. Die Funktion der Klasse wird nachfolgend beschrieben.

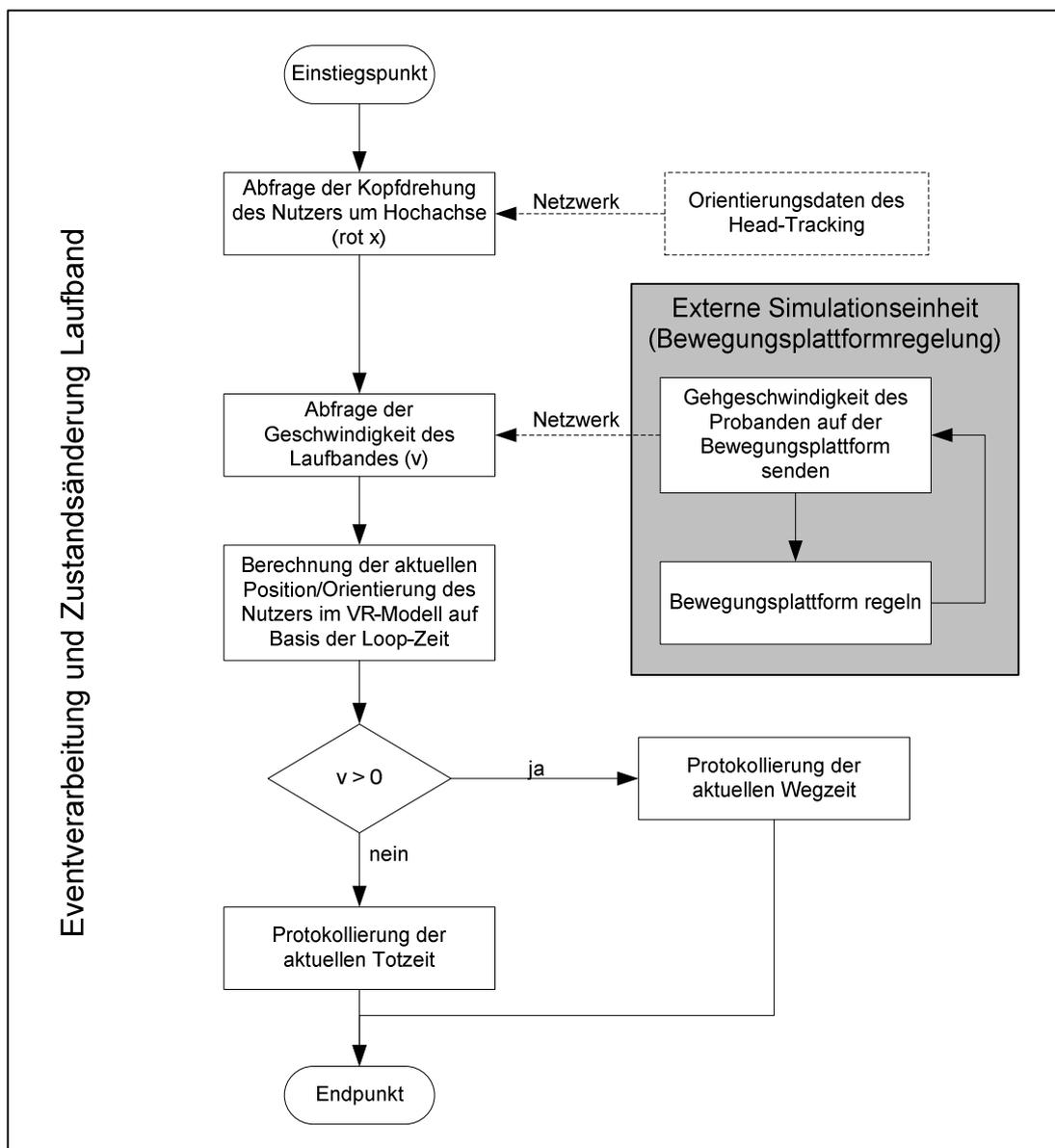


Abbildung 6-22: Ablaufdiagramm der Routinen in FMLTreadmill

Die erste in einer Simulationsschleife durchgeführte Operation ist die Anpassung der Position und Orientierung des Betrachters im Simulationsmodell auf Basis der per Netzwerk übermittelten Gehgeschwindigkeit und der Daten des Head-Trackings. Dabei ist besonders die Loop-Zeit, die zur Durchführung einer kompletten Simulations-

schleife benötigt wird, zu berücksichtigen. Diese bestimmt den zurückgelegten Weg, der sich aus Loop-Zeit und Gehgeschwindigkeit errechnet. Da diese Zeit variiert, muss sie bei jedem Durchlauf neu ermittelt werden, um anschließend als Berechnungsgrundlage dienen zu können. Wesentlich ist, dass dadurch sichergestellt wird, dass der auf dem Laufband real zurückgelegte Weg dem Weg im Cyberspace entspricht. Zudem erfolgt über entsprechende Funktionen, die im Modul Analyse vorgehalten werden, eine Protokollierung der Weg- bzw. Totzeit.

```

//Auslesen der aktuellen Laufbandgeschwindigkeit über das Netzwerk und als
//Daten-String in der Variable cVelPtr ablegen
char* cVelPtr;
cVelPtr = FMLUDPManager::getSingletonPtr()->GetReceiveBuffer(UDPTrackmillClient);

//Konvertierung des Daten-String in eine Fließkommazahl und der Variable
//fWalkSpeed zuzuweisen
float fWalkSpeed = stof(cVelPtr);

//Auslesen der Trackinginformationen und in der Variable pBody speichern mit Hilfe
//der Bibliothek dTracklib
dTracklib_body_type *pBody;
pBody = FMLTrackingContainer::getSingletonPtr()->GetDeviceData(FML_TRACKING_HEAD);

//Berechnung des ViewDirectionAngleTracking
float fViewDirectionAngleTracking = glm::Math::deg2Rad[pBody->ang[2]];

//Berechnung eines skalierten fScaledTrackingAngle zur Steigerung der
//Benutzerfreundlichkeit
float fScaledTrackingAngleY = glm::Math::sign<float>(fViewDirectionAngleTracking) *
(0.1f * pow(fViewDirectionAngleTracking, 2.0f));

//Berechnung des tatsächlichen Blickwinkels fViewDirectionAngle unter der Bedingung,
//dass ein Grenzwert fAngleThreshold überschritten wird
if (abs(pBody->ang[2]) > fAngleThreshold)
float fViewDirectionAngle = fViewDirectionAngle + fScaledTrackingAngleY;

//Berechnung der Rotationsmatrix mittels Quaternionen
Quatf fQuat;

//Drehung um Y-Achse
Vec3f fRotAxisY(0,1,0);

glm::normalize(fRotAxisY);
glm::setRot(fQuat, AxisAngleF(fViewDirectionAngle, fRotAxisY));
glm::setRot(fRotMatrix, fQuat);

//Berechnung des zurückgelegten Weges mittels der fLoopTime
float fDistance = fWalkSpeed * fLoopTime;

//Berechnung des Wegvektors
fWalkTreadmill[0] = fPrevPositionWS[0] - sin(fViewDirectionAngle) * fDistance;
fWalkTreadmill[1] = fBodyHeight;
fWalkTreadmill[2] = fPrevPositionWS[2] - cos(fViewDirectionAngle) * fDistance;

fCurrentPositionWS = fWalkTreadmill;
fPrevPositionWS = fCurrentPositionWS;

//Berechnung der Transformationsmatrix
glm::setTrans(TransMatrix, fCurrentPositionWS - glm::Vec3f(0.0f,0.14f,0.0f));
glm::Matrix44f tempMatrix;
CamMatrix = TransMatrix * fRotMatrix;

camera->setTransform(camMatrix);

```

Abbildung 6-23: Codepassagen aus FMLTreadmill

Die wesentlichen Codepassagen der Implementierung der FMLTreadmill Klasse sind in Abbildung 6-23 zu sehen und sollen an dieser Stelle beispielhaft einen Eindruck über die tatsächliche Implementierung vermitteln. Der komplette Quellcode wurde mit verständlichen Kommentaren zur Nachvollziehbarkeit versehen.

Zur realitätsnahen Interaktion in der Kommissionierumgebung, z.B. zum Picken von Objekten, ist eine Interaktionsmöglichkeit vorgesehen, die ein „realistisches“ Handling der Objekte zulässt. Neben dem Navigationsmodell wird hierzu unter Nutzung des Datenhandschuhs ein auf dem action-event-Prinzip basierendes Interaktionsmodell umgesetzt. Dabei sorgt ein bestimmtes Ereignis (event) dafür, dass eine entsprechende Aktion (action) ausgeführt wird.

Das gesamte Interaktionsverhalten zur Objektmanipulation in der virtuellen Szene wird über die Logik in der Klasse FMLGlove im Modul Interaktionsgeräte in Verbindung mit dem Geometriemodell (3D-Simulationsmodell) festgelegt. Abbildung 6-19 zeigt die Routinen, die während dem Durchlauf der Simulationsschleife ausgeführt werden. Nach erfolgter Aktualisierung des Systemzustandes durch das FMLTreadmill Objekt wird das virtuelle Interaktionsobjekt Hand mit den tatsächlichen Bewegungen des Nutzers überlagert und aktualisiert. Inputdaten hierfür werden zuvor von den entsprechenden Sensorsystemen (Tracking und Datenhandschuh) ausgelesen. Darauf hin erfolgt ein Check unterschiedlicher Eventsituationen, die entsprechende ActionEvents auslösen können. Ereignisse können unterschiedlichen Ursprungs sein, wobei zwischen physikalisch ausgelösten Ereignissen/Eingaben (Knöpfe, Gesten etc.) und virtuellen Schaltern bzw. geometrischen Ereignissen (z.B. Kollision zwischen zwei Objekten) unterschieden wird. Dabei werden die Objekte/Knoten, auf die sich die Ereignisse beziehen sollen, durch ihren Namen oder durch eine dynamische Selektion referenziert. Um dies zu ermöglichen, müssen entsprechend bei der 3D-Modellerstellung Restriktionen bei der Kennzeichnung von Objekten/Knoten beachtet werden, damit die Objektstrukturierung im Szenengraphen bekannt ist. Folgende ActionEvents können ausgelöst werden.

- ActionEvent Kommissionierliste anzeigen: Bei Erkennen der sogenannten Victory-Geste (physikalisches Ereignis bei dem Zeige- und Mittelfinger zu einem V geformt werden) wird die virtuelle Kommissionierliste in der virtuellen Umgebung dargestellt. Hierzu wird eine Art virtuelles Papierblatt mit der passenden Textur des Kommissionierauftrages belegt und visualisiert. Bezogen wird

die Textur von der Externen Simulationseinheit, nachdem ein Auftrag am Terminal angenommen wurde.

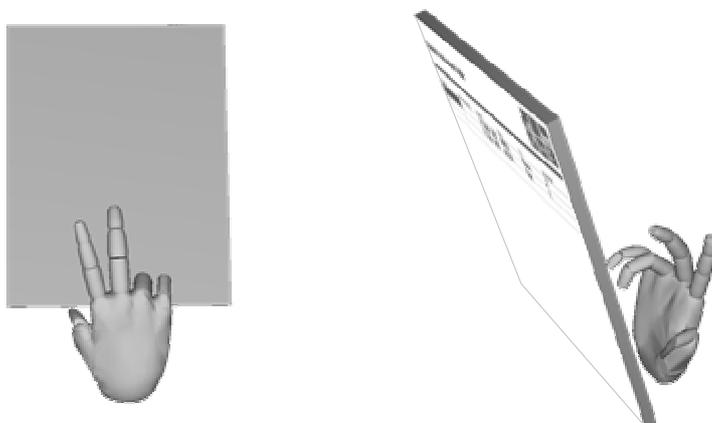


Abbildung 6-24: Action-Event Victory Geste

- ActionEvent Objekt picken: Kollidiert die virtuelle Hand, gesteuert durch den Nutzer, mit einem als Pickable Object (POBJ) deklarierten Objekt, z.B. einer Pickeinheit, so wird bei erkannter Greifgeste das entsprechende Objekt gegriffen, wie dies auch in der Realität der Fall wäre (physikalisches und geometrisches Ereignis). Dies erfolgt durch Bindung des virtuellen Objektes an die virtuelle Hand. Wurde bereits ein Objekt gepickt, so wird dieses weiter an die dreidimensionale Repräsentation der Hand im virtuellen Raum gebunden, vorausgesetzt der Nutzer signalisiert dies durch eine Greifgeste. Gleichzeitig wird mittels des Analysemoduls die Greifzeit über entsprechende Ereignismarken mit Zeitangaben protokolliert und im Speicher hinterlegt (siehe Abschnitt 6.6.4).

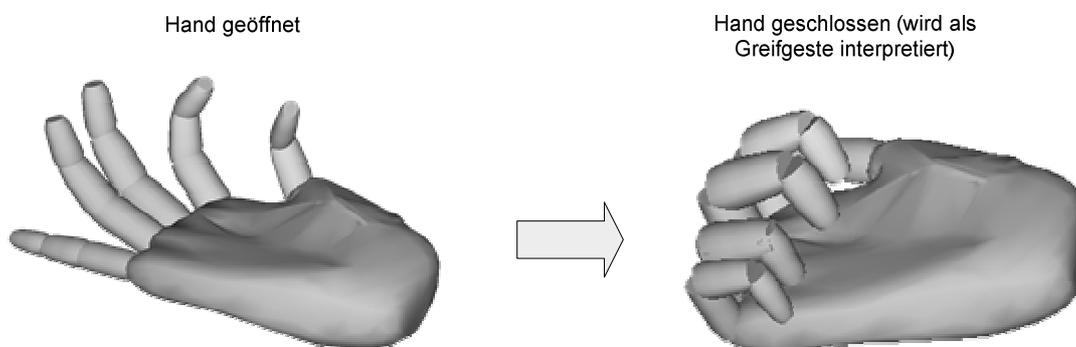


Abbildung 6-25: Action-Event – Greifgeste

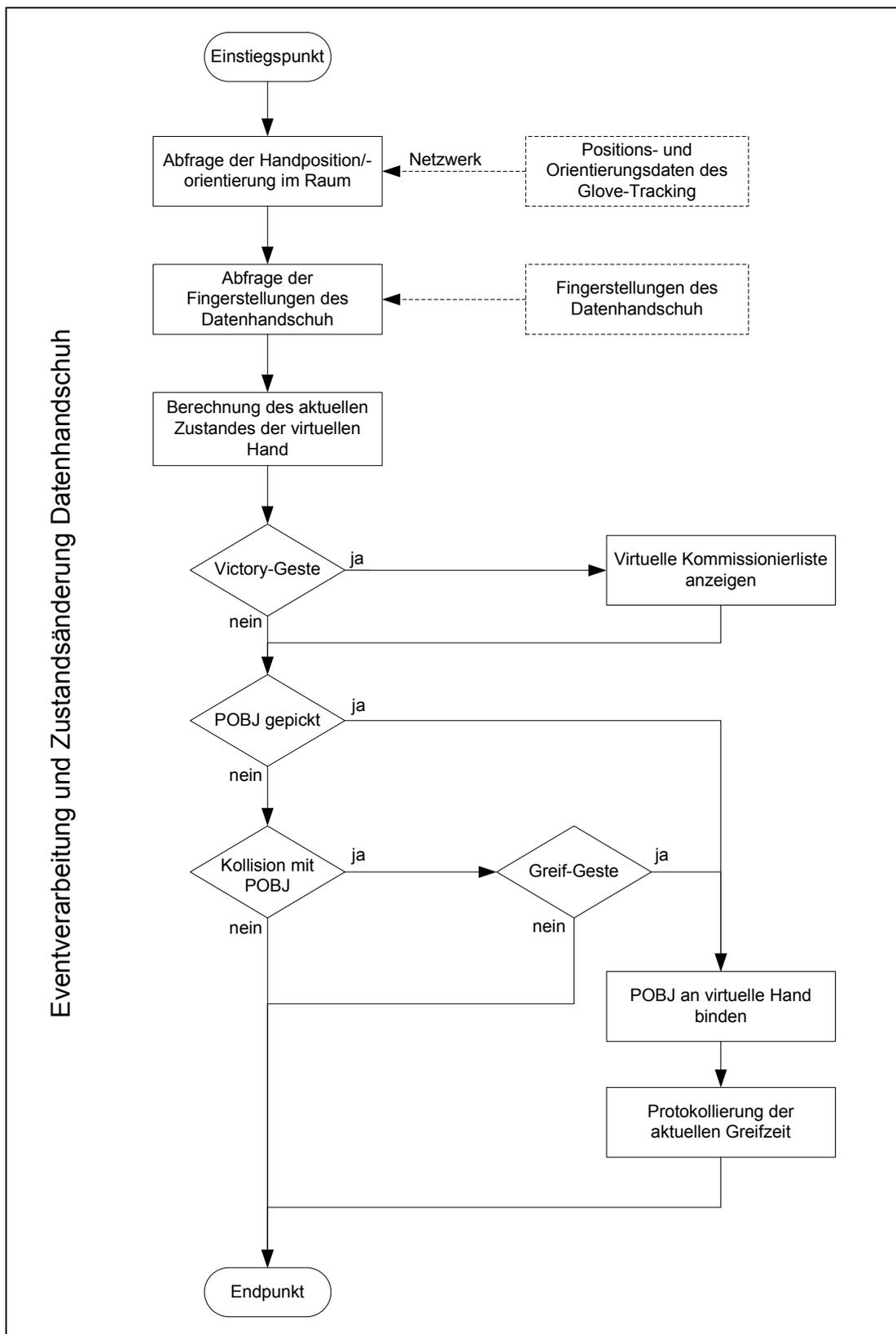


Abbildung 6-26: Ablaufdiagramm der Routinen in FMLGlove

6.6.3 Das Modul Simulationslogik

Dieses Modul besteht im Wesentlichen aus der Klasse FMLWorker, die die Simulationslogik des Simulators beinhaltet. Dabei wird ebenfalls wie zuvor das ActionEvent-Prinzip umgesetzt und mit der Simulationslogik kombiniert. Zusätzlich wird in dieser Klasse auch das Verhalten des virtuellen Kommissionierwagens implementiert. Dazu wird in einem ersten Ablaufschritt mit einer Funktion zur Zustandsaktualisierung des virtuellen Trolleys begonnen. Anschließend erfolgt die Analyse verschiedener Event-situationen.

- ActionEvent Objekt auf Trolley ablegen: Bei einer Kollision eines gepickten Objektes mit dem virtuellen Kommissionierwagen wird der entsprechende Gegenstand an den Wagen gebunden.
- ActionEvent Auftrag annehmen: Kollidiert die virtuelle Hand, gesteuert durch den Nutzer mit dem als Terminal deklarierten Objekt in der Virtuellen Realität, so wird von der Simulationslogik der Auftrag gestartet. Dazu wird der entsprechende Auftrag am Monitor des Auftragsannahmeterminals als Textur in der virtuellen Umgebung visualisiert. Dabei wird die zuvor im Auftragsgenerator der Externen Simulationseinheit generierte Auftrags-Textur per Netzwerk bezogen. Gleichzeitig wird von der Simulationslogik die Analysedatenerfassung/Zeiterfassungsfunktion gestartet.
- ActionEvent Auftrag abschließen: Wird vom System eine Kollision zwischen Abgabestation (deklariert als Delivery_Station) und Kommissionierwagen erkannt, so veranlasst die Logik, dass der Auftrag beendet wird und die berechneten Analysedaten per Netzwerk an die Externe Simulationseinheit gesendet werden. Die externe Software schreibt die in der Simulation ermittelten Daten in eine Datenbank und stellt diese somit für weitergehende Analysen zur Verfügung. Nach einer Initialisierung des Analysedatenerfassungsmoduls kann ein neuer Auftrag von der Simulationslogik gestartet werden.

Wichtig ist die abschließende Ermittlung der Loop-Zeit am Ende aller abgearbeiteten Routinen für eine durchlaufene Simulationsschleife. Diese ist von entscheidender Bedeutung zur Berechnung der zurückgelegten Distanz auf dem Laufband und wird als Input für die FMLTreadmill Klasse bereitgestellt. Anschließend kann auf Basis der erfolgten Zustandsänderungen die Szene gerendert und visualisiert werden, bevor eine neue Simulationsschleife startet.

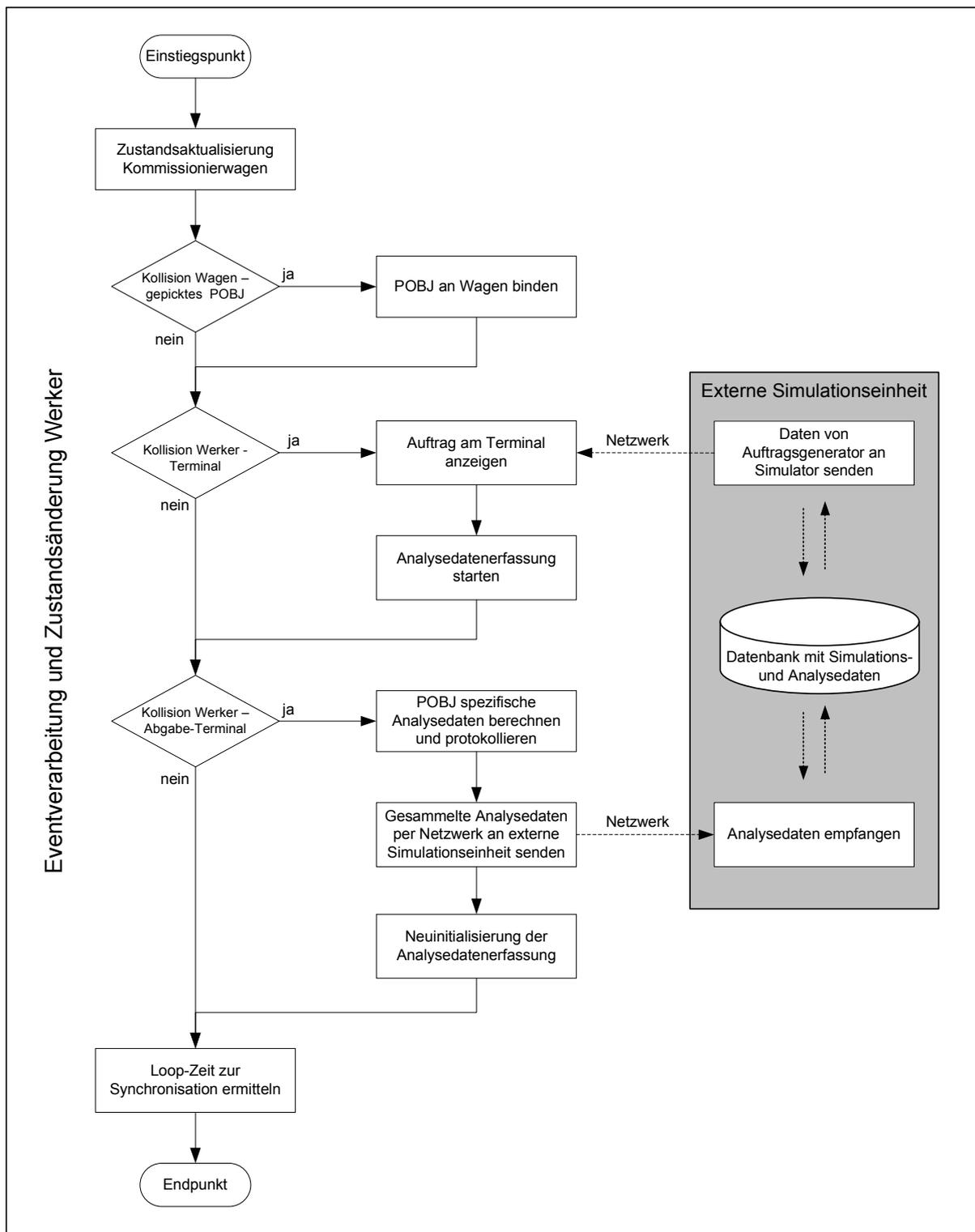


Abbildung 6-27: Ablaufdiagramm für Routinen in FMLWorker

6.6.4 Das Analysemodul

In der Regel ist eine schnelle Abwicklung der Kommissionieraufträge erwünscht, weshalb im Rahmen der Planung bzw. der Leistungsbewertung insbesondere die dazu benötigte Zeit von Interesse ist. Zur Untersuchung der Zeitanteile wurde aus diesem Grund eine automatisierte Zeitnahmefunktion im Rahmen der Simulatorplattform implementiert. Insbesondere ist diese für die Erfassung der Zeit-Daten im Rahmen der Probandenversuche von Interesse. Damit können sehr schnell in unterschiedlichen Szenarien mit verschiedenen Probanden Simulationen durchgeführt und Zeiten zu Analyse Zwecken erfasst werden.

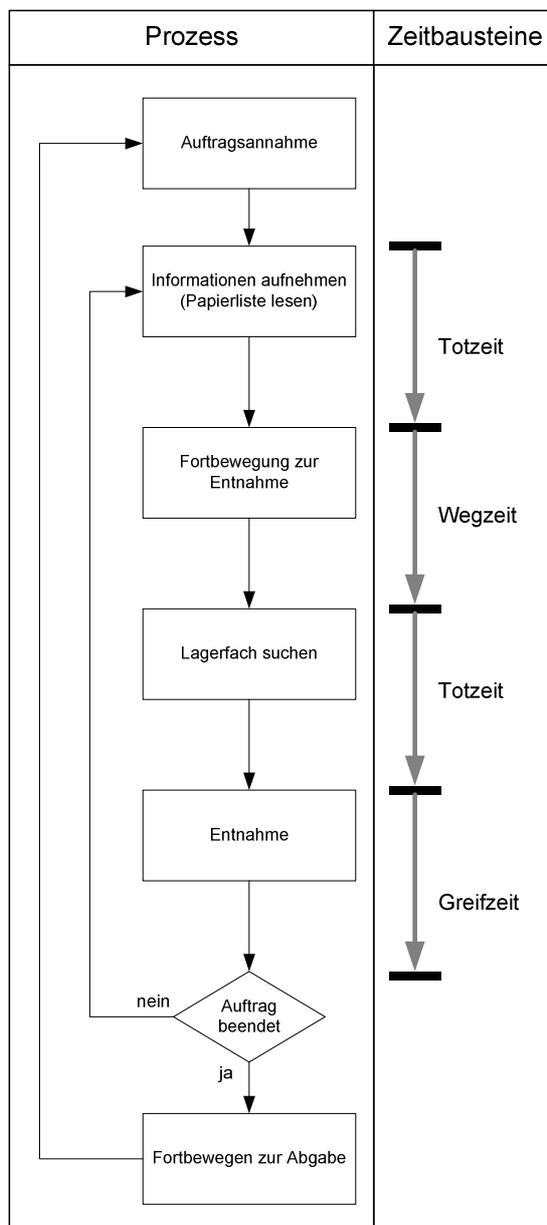


Abbildung 6-28: Zeitbausteine der Kommissionierung

Hierzu wird im Rahmen des Analysemoduls die Klasse FMLAnalyse und FMLAnalyseResult implementiert. Diese beinhalten alle notwendigen Funktionen und Routinen zur Berechnung der entsprechenden Zeitanteile/Zeitbausteine in der Kommissionierung, die später in der Externen Simulationseinheit als Grundlage für weitere Berechnungen zu Auswertungszwecken dienen. Im Rahmen des Analysemoduls werden daher die elementaren Zeitanteile Totzeit, Greifzeit und Wegzeit spezifisch für jedes gepickte Objekt ermittelt. Abbildung 6-28 zeigt den Kommissionierprozess mit den zugehörigen Zeitbausteinen. Dabei sind die Bausteine wie folgt zu charakterisieren [ARN-05]:

- Totzeit: Zeitanteile, die für jede Position neben der Zeit für die physische Materialbewegung und Fortbewegung des Kommissionierers aufzuwenden sind, z.B. Lesen, Suchen, Zählen, Quittieren, Korrigieren
- Greifzeit: Zeitanteile der Materialbewegung, z.B. für das Bücken, Aufnehmen und Ablegen der Artikel einer Position
- Wegzeit: Zeitanteile für die Bewegung des Kommissionierers oder der Ladeeinheiten

Zum Zweck der Zeiterfassung wird der rechnerinterne Systemzeitgeber verwendet, der die verstrichene Zeit ab Start des Systems in Millisekunden angibt. Dieser ermöglicht es, in der FMLAnalyse Klasse konkrete Zeitpunkte zu protokollieren, mit Ereignismarken zu versehen und in Variablen abzulegen. Die Erzeugung von Ereignismarken (z.B. stehenbleiben, losgehen, greifen, loslassen etc.) erfolgt dabei durch die Module Interaktionsgeräte und Simulationslogik. Läuft der Nutzer beispielsweise los, so wird von der Klasse FMLTreadmill die Ereignismarke „losgehen“ erzeugt, die mit dem entsprechenden Zeitpunkt in der FMLAnalyse Klasse gespeichert wird. Zudem werden auch Objektidentifikationen gespeichert, die bestimmte Ereignismarken betreffen, um später objektbezogene Informationen generieren zu können.

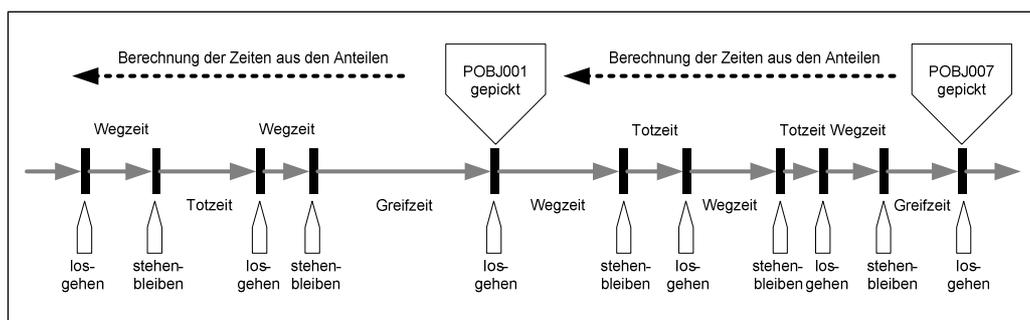


Abbildung 6-29: Zeitnahmeschema

Basierend auf den Ereignismarken werden mit Hilfe eines Algorithmus die Zeitbausteine Tot-, Weg- und Greifzeit für das jeweilige Objekt rückwärtsgerichtet berechnet (siehe Abbildung 6-29). Dabei erfolgt die objektbezogene Summierung der Weg-, Tot- und Greifzeitanteile (siehe folgende Formeln) zwischen zwei Ereignismarken, an denen ein Objekt gepickt (kommissioniert) wurde.

$$Wegzeit_{POBJ} = \sum Wegzeitanteile_{POBJ}$$

$$Totzeit_{POBJ} = \sum Totzeitanteile_{POBJ}$$

$$Greifzeit_{POBJ} = \sum Greifzeitanteile_{POBJ}$$

Die Berechnung objektspezifischer Analyseinformationen startet nach Beendigung des Auftrages (Kollisionsevent Werker - Abgabestation) in der virtuellen Umgebung. Nach Abschluss der Berechnungen werden die Daten an die Externe Simulationseinheit gesendet und in einer Datenbank zu Auswertezwecken hinterlegt.

6.7 Die Externe Simulationseinheit

Zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Simulationsläufe wurde ein externes, eigenständiges Modul in der Sprache C# unter Visual Studio 2005 implementiert, das per LAN (Local Area Network) in den Simulationsprozess eingebunden ist. Die Externe Simulationseinheit soll vor allem in Hinblick auf die durchzuführende Evaluierung der Simulationsplattform unterstützen. Folgende Gedanken liegen der Einführung einer Externen Simulationseinheit zu Grunde:

- Entlastung des Simulationsframeworks von belastungsintensiven Aufgaben der Informationsverarbeitung (Datenbankanbindung, Generierung Simulationsrelevanter Informationen z.B. Texturen zur Laufzeit etc.) zur Begünstigung des Echtzeitverhaltens der Simulation
- Komplexitätsreduzierung durch Modularisierung der Simulationsplattform
- Schaffung einer eigenständigen Datenbasis zur MI-Simulation in Form einer zentralen Datenbank, die alle relevanten Informationen enthält
- Bereitstellung von Funktionen zum Pre- und Postprocessing

Vor allem im Rahmen der Simulationsvorbereitung (Preprocessing) und der Simulationsnachbereitung bzw. Analysedatenauswertung (Postprocessing) spielt dieses Mo-

6 Konzipierung und Realisierung einer Plattform zur MI-Simulation

dul eine wesentliche Rolle. Zum einen ist es möglich, Kommissionieraufträge bzw. -szenarien schnell und einfach für ein Probandenprogramm zu konfigurieren und in der Datenbank zu hinterlegen. Die Auftragsszenarien werden zur Laufzeit in die Menschintegrierte Simulation eingebunden und dienen dem Nutzer zur Durchführung der Simulation. Der Proband bekommt dabei exakt die zuvor konfigurierten Auftrags-szenarien in Form virtueller Kommissionierlisten in der Virtuellen Realität zur Verfügung gestellt. Während der Simulation werden logistische Kennzahlen (Weg-, Tot- und Greifzeiten) von der Simulationsplattform automatisiert protokolliert und nach erfolgter Durchführung eines Simulationslaufes per LAN vom Simulationsframework an die Externe Simulationseinheit übermittelt, die die Daten in der Datenbank ablegt. Nach abgeschlossener Versuchsdurchführung ist ein wichtiger Punkt die gezielte Auswertung der gespeicherten Analysedaten. Dies soll mit Hilfe der Externen Simulationseinheit z.B. in Form von Durchschnittswertberechnungen und Balkendiagrammen bezogen auf die Probanden bzw. Auftragsszenarien erfolgen. Dadurch werden die Simulationsergebnisse schnell in visuell verständlicher Form auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen veranschaulicht. Zentraler Ausgangspunkt hierbei ist der Zugriff auf die zentrale Datenbasis/Datenbank der Externen Simulationseinheit, in der die Informationen transparent, strukturiert gespeichert sind. Über entsprechende SQL-Abfragen können gezielt die benötigten Daten gefiltert und zu weiterführenden Berechnungen herangezogen werden.

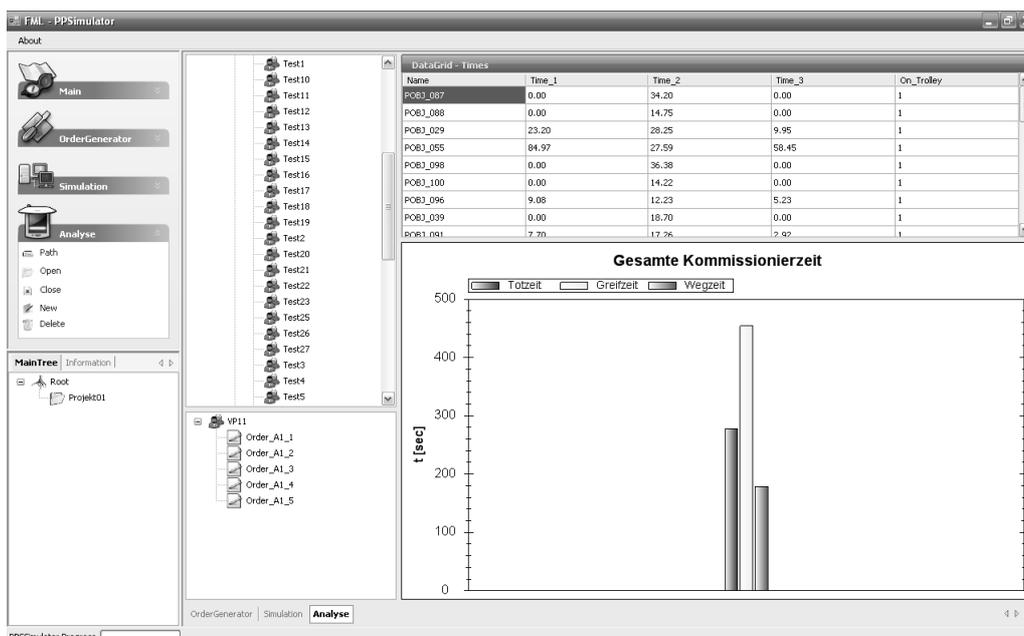


Abbildung 6-30: Bedienoberfläche der Externen Simulationseinheit

7 Evaluierung der MI-Simulation

Nach der Realisierung der Simulationsplattform widmet sich folgendes Kapitel der Evaluierung des Lösungsansatzes der MI-Simulation. In Kapitel 1 wurde die Zielsetzung formuliert, zu analysieren, wie sich der neuartige Ansatz als Planungsmedium in der Logistik eignet. Dazu wird die Annahme getroffen, dass Materialflusssysteme unter Einbeziehung des Menschen realitätsnah zum Zwecke der Planung simuliert werden können. Basierend darauf gilt es, nachfolgend konkrete Untersuchungen zum Einsatz der Menschintegrierten Simulation durchzuführen, um auf deren Grundlage die beschriebene Annahme zu diskutieren. Die Untersuchungen orientieren sich dabei im Wesentlichen an den Interaktionsgeräten, dem Simulationsmodell und dem Menschen. Im Folgenden wird kurz dargestellt, weshalb diese Untersuchungsgegenstände von Interesse sind.

Interaktionsgeräte

Hinsichtlich des technologischen Systemaufbaus sind die Interaktionsgeräte von besonderer Bedeutung. Sie stellen die physische Schnittstelle zum Anwender dar und sind dementsprechend bezüglich intuitiver Bedienung und Ergonomie zu untersuchen. Nur eine intuitive Bedienung der Simulation kann gewährleisten, dass verwertbare Simulationsergebnisse zu erwarten sind und die MI-Simulation vom Nutzer angenommen wird.

Simulationsmodell

Neben der physischen Schnittstelle der Interaktionsgeräte ist das Simulationsmodell im Rahmen der MI-Simulation von Bedeutung. Dabei ist unter Simulationsmodell sowohl das logische Aspekte abbildende Modell (Simulationslogik) zu verstehen als auch das räumlich-geometrische Modell (3D-Modell). Ein entsprechendes Modell muss Anforderungen an eine realistische Abbildung (Prozesse etc.) eines Materialflusssystems erfüllen, um eine Menschintegrierte Simulation zu erlauben und um entsprechend sinnvolle Ergebnisse aus der Simulation zu erhalten.

Mensch

Interaktionsgeräte und Simulationsmodell schaffen die Grundlagen für eine realitätsnahe Simulation menschbezogener Prozesse der Logistik. Außer den technischen

Aspekten ist es aber auch wichtig, die Sichtweise des Menschen zu untersuchen. Wie ordnet er beispielsweise die Potenziale dieser Technologie ein? Ist der Mensch bereit, sich auf diese Art der Simulation einzulassen? Aussagekräftige Simulationsergebnisse (z.B. Kennzahlen) sind nur mit Nutzern zu erzielen, die sich in die virtuelle Welt auf mentaler Ebene integrieren lassen und diese zumindest teilweise als real empfinden.

Daraus lassen sich folgende konkrete Fragestellungen ableiten:

- Sind die Interaktionsgeräte intuitiv zu bedienen?
- Können logistische Prozesse/Systeme im Rahmen eines Simulationsmodells realitätsnah abgebildet und simuliert werden?
- Lässt sich der Mensch in die MI-Simulation integrieren?

Um diese Fragen zu beantworten, werden folgende Untersuchungen durchgeführt. Zum einen werden quantitativ erfassbare logistische Kennzahlen (Weg-, Tot-, Greifzeit) sowohl in einem Realen als auch in einem in der Virtuellen Realität stattfindenden Versuch in einem Kommissionierszenario ermittelt. Durch Vergleich der erzielten Ergebnisse können Rückschlüsse auf die Güte der Kennzahlen und damit auf die Eignung der Interaktionsgeräte bzw. des Simulationsmodells gezogen werden. Zum anderen erfolgt eine Untersuchung anhand qualitativer Kriterien, die mit Hilfe eines Fragebogens ermittelt werden. Dadurch wird neben der qualitativen Evaluierung der Interaktionsgeräte und des Simulationsmodells vor allem auch die Sichtweise des Menschen erfasst.

Auf Basis der bei den Untersuchungen zu erlangenden Erkenntnisse soll letztlich die Frage beantwortet werden, ob logistische Prozesse realitätsnah durch Integration des Menschen simulierbar sind.

7.1 Szenario für den Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Untersuchungen wird das Versuchslager des Instituts herangezogen. Das Szenario für den Versuchsaufbau stellt sich für die Versuche in der Virtuellen Realität und in der Realität gleich dar und orientiert sich am realen Lager. In der Menschintegrierten Simulation kommt dabei ein virtuelles 1:1 Abbild der physisch existenten Versuchsumgebung zum Einsatz.



Abbildung 7-1: Reales Versuchslager am Lehrstuhl fmi

Untersucht wird die einstufige, eindimensionale Kommissionierung mit Gangwechsel nach dem Prinzip „Mann zur Ware“. Hierzu steht am Institut in der Versuchshalle (Abbildung 7-1) ein Lager in Form von vier Regalzeilen mit zwei Lagergassen zur Verfügung. Jede Zeile besteht aus fünf Regalebenen mit jeweils 14 Lagerplätzen, sodass alles in allem 280 Sichtkästen im Lager Platz finden. Insgesamt steht ein Artikelspektrum von 59 Teilen bereit, das fest definiert für alle Versuchsszenarien gleich ist. Bei den Teilen handelt es sich um einfache Geometrien (vornehmlich Kleinkartons für Schrauben, welche in der virtuellen Welt als virtuelle Würfel nachgestellt werden), so dass Sonderfälle wie das Vereinzeln von verkeilten Artikeln (z. B. Sicherungsringe) prozesstechnisch nicht abgebildet werden müssen.

7.2 Probandenprogramm

Als Versuchspersonen dienen Studenten und Industriemechaniker. Die Probanden haben jeweils fünf Kommissionieraufträge in einem realen und virtuellen Versuch zu bewältigen. Es werden dabei drei kleine Aufträge mit je drei Positionen und zwei große Aufträge mit sieben Positionen ausgewählt. Die Aufteilung zwischen drei und

sieben Positionen ist unter dem Aspekt zu sehen, dass ab drei Positionen pro Auftrag eine beleglose Kommissionierung in Betracht gezogen werden muss [VOG-97]. Pro Position werden maximal zwei Entnahmeeinheiten und pro Auftrag maximal vier (bei drei Positionen) bzw. neun Entnahmeeinheiten (bei sieben Positionen) entnommen. Die Probanden arbeiten bei jedem Einzelversuch in der jeweiligen Versuchsumgebung (real bzw. virtuell) die Aufträge sequentiell in der gleichen Reihenfolge ab, d.h. es wird mit Auftrag 1 gestartet und mit Auftrag 5 endet der Versuch. Die Reihenfolge der Auftragsabarbeitung (wegoptimierte Kommissionierung) wird von einem WMS (Warehouse Management System) festgelegt und auf das Versuchsszenario übertragen.

Die Versuche werden von allen Versuchspersonen durchgeführt, wobei jeder, wie erwähnt, pro Versuch die fünf Aufträge in gleicher Reihenfolge zu erledigen hat. Jedoch wird die Reihenfolge, in der die Experimente (real u. virtuell) von den Probanden durchgeführt werden, in zwei Versuchsreihen gruppiert. Hierdurch wird der sich zwangsweise einstellende Trainingseffekt für die Auswertung vermieden, sodass keine Verfälschung der Ergebnisse auftritt. Demnach gibt es zwei Gruppen, die die Versuche in folgender Reihe durchführen:

1. Pickliste (real) MI-Simulation
2. MI-Simulation Pickliste (real)

Zu Beginn der Versuche werden die Grunddaten der Probanden per Fragebogen erhoben (Alter, Geschlecht, Erfahrung im Umgang mit Computerspielen etc.). Nach der Zuteilung zu einer der zwei Versuchsreihen erhält der Proband eine Kurzeinweisung, um auf den Ablauf und notwendige Randbedingungen aufmerksam gemacht zu werden (z.B. wurden die Probanden angewiesen, den Kommissionierwagen inkl. Sammelbehälter bei der Abarbeitung der Aufträge mitzuführen). Zum Versuch in der Virtuellen Realität erhält der Proband zusätzlich eine kurze Unterweisung zur Benutzung der Interaktionsgeräte. Anschließend erledigt der Proband die Kommissionieraufträge entsprechend dem vorgegebenen Prozess. Der grundlegende Ablauf lässt sich erfassungstechnisch in Weg-, Greif- und Totzeiten unterteilen. Die Weg- und die Greifzeit umfassen die physischen Vorgänge Bewegung zum Lagerplatz und das Greifen der Artikel. Die Totzeit beschreibt unproduktive Vorgänge wie das Suchen oder Kodieren von Informationen und Wartezeiten.

Kognitive Belastung

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

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

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

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

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

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

...

Abbildung 7-2: Auszug der Fragen zur kognitiven Belastung

Alle Versuche werden per Videoaufnahme dokumentiert, sodass anschließend die Zeitkomponenten der Prozesse innerhalb der Kommissionierung separat betrachtet und analysiert werden können. Nach Abschluss der Kommissioniertätigkeit erhält der Proband zu jeden Versuch einen Fragebogen, der Fragenblöcke zu den Themen Akzeptanz, kognitive Belastung usw. als auch zum Versuch gehörende spezifische Fragenpakete enthält. Dies ermöglicht einerseits den Vergleich der verschiedenen Versuche zu Diskussionszwecken untereinander wie auch eine Analyse von technologieabhängigen Kriterien (siehe Abbildung 7-3 und Abbildung 7-2).

Fragebogen zur Einschätzung Ihrer Tätigkeit in der virtuellen Kommissionierumgebung						
Codenummer	VP					
Motivation & Akzeptanz						
	Stimmt überhaupt nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt ein wenig	Stimmt weitgehend	Stimmt genau
Ich fand das Kommissionieren in dieser Form sehr interessant.	<input type="checkbox"/>					
Meine Motivation für die Tätigkeit ist gestiegen.	<input type="checkbox"/>					
Die Tätigkeit machte mir großen Spaß.	<input type="checkbox"/>					
Ich würde diese Form des Kommissionierens zur Aufgabenbewältigung/zur Schulung empfehlen.	<input type="checkbox"/>					
...						
3D-Visualisierung						
Verständlichkeit						
	Stimmt überhaupt nicht	Stimmt weitgehend nicht	Stimmt eher nicht	Stimmt ein wenig	Stimmt weitgehend	Stimmt genau
Es war einfach, mit der Datenbrille zu navigieren.	<input type="checkbox"/>					
Es war einfach, mit dem Handschuh zu greifen.	<input type="checkbox"/>					
Es war einfach, das Laufband zu bedienen.	<input type="checkbox"/>					
Es war einfach, mit der 3D-Visualisierung zu arbeiten.	<input type="checkbox"/>					
Ich fand die virtuelle Welt verständlich.	<input type="checkbox"/>					
Ich fand es schwierig, mich in der virtuellen Welt zurecht zu finden.	<input type="checkbox"/>					
...						

Abbildung 7-3: Fragen zu Motivation & Akzeptanz sowie zur 3D-Visualisierung

Zusätzlich enthält jeder Bogen eine offene Frage, um den Probanden die Möglichkeit zu geben, Verbesserungsvorschläge für die einzelnen Systeme einzubringen. Nach Beendigung einer Versuchsreihe werden vom Versuchsteam die Kommissionierfehler (Mengenfehler bzw. Artikelfehler) festgestellt und dokumentiert.

7.3 Versuchsaufbau und -beschreibung Menschintegrierte Simulation

Als Beispielszenario wird ein manuelles Kommissioniersystem nach dem Prinzip „Mann zur Ware“ zu Grunde gelegt und in Form einer Rechnerrepräsentation umgesetzt. Das abzubildende Modell orientiert sich an der real existierenden Kommissionierumgebung, die in der Versuchshalle des Instituts aufgebaut ist (siehe Abschnitt 7.1). Zum Aufbau der virtuellen Umgebung (siehe Abbildung 7-4) wird 3D Studio Max verwendet. In den Sichtlagerkästen befinden sich gefärbte Würfel, die die Pickartikel darstellen. Auf Grund der rechenintensiven Visualisierungsvorgänge wurde auf eine detailgetreue Abbildung des Sortiments verzichtet. Das Lager beinhaltet insgesamt 100 Objekte, die beliebig in Kommissionieraufträgen als zu pickende Einheit deklariert werden können. Zur Erhöhung des Realitätsgrades werden die Regale mit realistischen Texturen der Lagerplatzbezeichnungen versehen (siehe Abbildung 7-5).

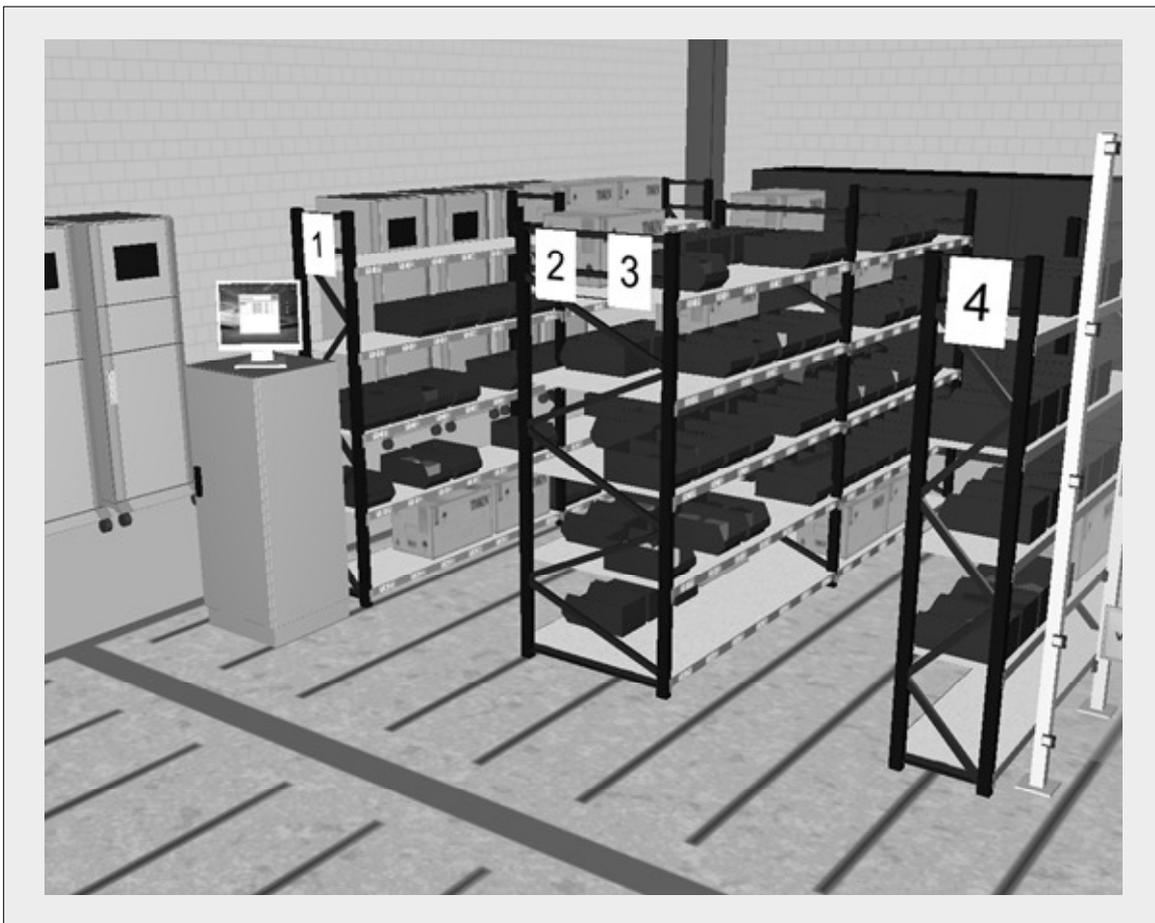


Abbildung 7-4: Virtuelles Kommissioniersystem

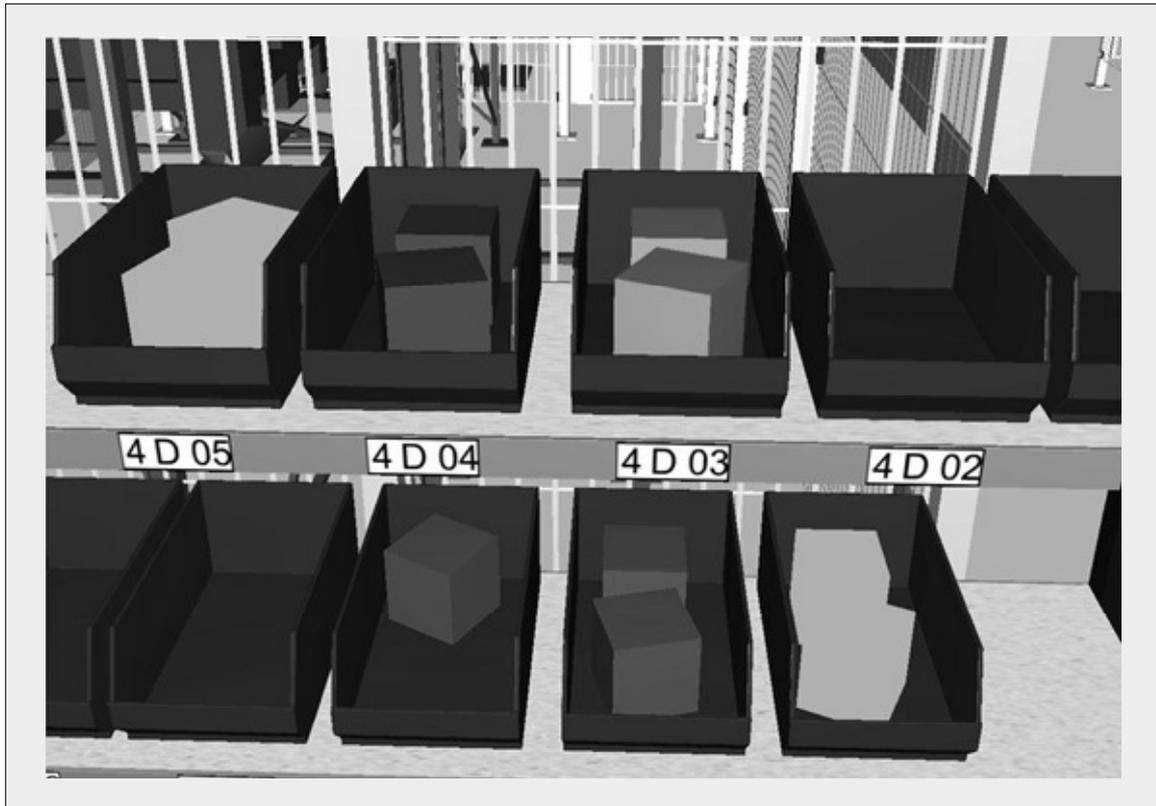


Abbildung 7-5: Lagerplatzabbildung in der VR

Auf Basis dieses Modells können Probanden im virtuellen System exakt dieselben Kommissionieraufgaben ausführen wie im realen System, womit letztendlich eine Untersuchung der erzielten Ergebnisse erfolgen kann. Konkret sollen Weg-, Greif- und Totzeiten sowie die gesamte Kommissionierzeit analysiert werden, um eine Diskussion über die Güte der in einer MI-Simulation erzielbaren Simulationsergebnisse durchführen zu können.

In Abbildung 7-6 ist der physische Versuchsaufbau der Simulationsplattform mit einem Probanden bei einem Pickvorgang abgebildet. Deutlich ist der graue Würfel zu erkennen, der gerade auf dem virtuellen Kommissionierwagen mit Hilfe des Datenhandschuhs abgelegt wird.



Abbildung 7-6: Proband bei einem Versuchslauf

Wie in Abbildung 7-7 dargestellt, beginnt ein Kommissionierzyklus mit der Auftragsannahme an der Basis. Im virtuellen Modell erfolgt dies durch die gewünschte Kollision von virtueller Datenhand, die durch den Datenhandschuh gesteuert wird, mit der Basis. Nach Annahme des Auftrages kann der Proband mit Hilfe der Bewegungsplattform und des Datenhandschuhes durch die Regalgassen navigieren und Artikel entsprechend der Pick-Liste entnehmen. Nach Beendigung der Pickvorgänge wird der Auftrag an der Abgabestation durch Quittierung abgeschlossen (Kollision mit Abgabepplatz) und ein neuer Auftrag kann angenommen werden. Im Hintergrund der Simulationsanwendung werden vollautomatisch Weg-, Greif- und Totzeiten dokumentiert, die der späteren Auswertung dienen. In Abbildung 7-8 ist der Vorgang der virtuellen Kommissionierung in einer Bilderfolge dargestellt. Die Bilder zeigen dabei die wichtigsten Aktionssequenzen entsprechend dem Kommissionierablauf, die ein Proband in einem Versuch durchzuführen hat.

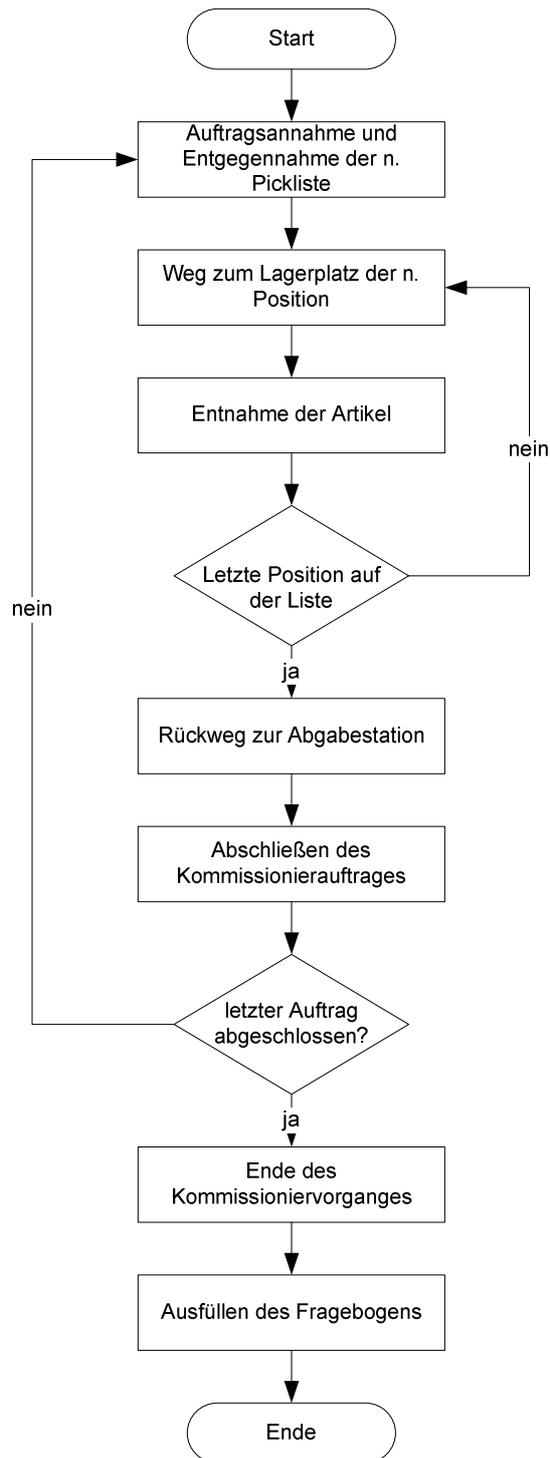


Abbildung 7-7: Ablauf der Versuchsreihe „Menschintegrierte Simulation“



Abbildung 7-8: Chronologischer Ablauf der Kommissionierung in der VR

7.4 Versuchsaufbau und -beschreibung realer Versuch

Die herkömmlichste Methode zu kommissionieren erfolgt mit einer Auftragsliste in Papierform (siehe Abbildung 7-9). Im folgenden Absatz werden einige allgemeine Aspekte zu diesem Kommissionierverfahren und zum Versuchsaufbau erläutert.



Abbildung 7-9: Kommissioniererin mit Liste

Der Umgang mit Papierlisten ist für den Menschen zunächst vertraut und somit sind die Abläufe einfach zu erlernen. Auf der Liste sind in einer übersichtlichen Form alle für den Auftrag wichtigen Daten abgebildet. Es kann sogar ein Barcode zu Identifikationszwecken zum Abscannen abgedruckt sein. Ohne Scannen kann dies über eine manuelle Eingabe an einem Rechner erfolgen. Das System ist einfach zu handhaben und auch flexibel einsetzbar.

Für die Versuche werden eigene Picklisten entworfen. Abbildung 7-10 zeigt die Liste für einen „großen“ Auftrag mit sieben Positionen. Die Nummer des jeweiligen Auftrags ist oben links, die aktuelle Seite oben rechts angegeben. Die Aufträge sind noch so klein, so dass jeweils nur eine Seite Papier benötigt wird. Somit ist der Nachteil, dass durch mehrere Seiten navigiert werden muss, nicht gegeben. Die für die Versuche wichtigen Daten umfassen den Lagerplatz, den Artikel mit Nummer und Beschreibung sowie die Entnahmemenge. Da die Artikel in der VR kein Etikett mit der Artikelnummer tragen, werden diese mit unterschiedlichen Farben unterschieden. Diese ist auch auf den Kommissionierlisten festgehalten.



Kommissionierauftrag

Auftrag Nr.: 5
Seite: 1

Pos	Lagerplatz	Bezeichnung	Entnahmemenge
1	2B12	Edding 435104 <i>gelb</i>	1
2	2B11	Scheibe 10,5 DIN 9021 5290211058 <i>blau</i>	1
3	2C12	Scheibe 8,4 DIN 125 A 5201258848 <i>pink</i>	1
4	1C11	Sechskantmutter M10x1 DIN 439 520439101 <i>rot</i>	1
5	3D06	Zylinderschraube M4x10 DIN 912 520912410 <i>rot</i>	2
6	4D09	Sechskantschraube M4x30 DIN 933 520933430 <i>pink</i>	1
7	4C11	Zylinderschraube M8x80 DIN 912 520912880 <i>blau</i>	2

Kommissioniert am:
Unterschrift:

Abbildung 7-10: Kommissionierliste mit sieben Positionen

Beim Aufbau einer Kommissionierliste ist darauf zu achten, dass diese übersichtlich gestaltet wird und der Mitarbeiter die nötigen Daten ohne großen kognitiven Aufwand zu dem Zeitpunkt findet, an dem er sie braucht. Die einzelnen Zeilen sowie die einzelnen Daten der Auftragszeile sollen klar voneinander unterscheidbar sein. Entsprechend wurden die drei Teile Lagerplatz, Artikel und Entnahmemenge voneinander getrennt aufgeführt. Die Leserichtung ist von links nach rechts und somit wurden die Daten in der Reihenfolge angeordnet, in der sie der Kommissionierer braucht: zuerst der Lagerplatz, dann der Artikel und am Ende die Menge. Die Artikelbeschreibung ist eine zusätzliche Angabe, um Kommissionierfehler zu vermeiden. Der Lagerplatz als erstes Element wurde optisch hervorgehoben. Manche Kommissionierer lesen bevorzugt die Artikelnummer, andere die Bezeichnung, so dass beide Informationen angegeben werden. Die Nummer der Position ist für den Kommissionierer unwichtig, aber sie dient als Ordnungsmerkmal in der Liste. Bei der Versuchsdurchführung werden die ausgedruckten Listen bereitgestellt. Der Ablauf des Versuchs mit der Kom-

missionierliste ist identisch dem Ablauf der Kommissionierung im Rahmen der MI-Simulation (siehe Abbildung 7-7).

Zur Dokumentation der Versuche erfolgt ein Videomitschnitt. Die Videoaufnahme wird gestartet, sobald der Proband mit dem Kommissioniervorgang beginnt und endet mit der Ablage des letzten Sammelbehälters auf dem Abgabetisch.

7.5 Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung basiert auf den gewonnenen Daten eines insgesamt dreitägigen Versuchsprogramms, an dem 18 Probanden teilgenommen haben. Dabei wurden Zeitreihen erfasst und jeder Proband musste einen mehrere Seiten umfassenden Fragebogen ausfüllen. Diese Daten sollen Aufschluss über Interaktionsgeräte, Simulationsmodell und den Akteur der Simulation selbst geben.

7.5.1 Untersuchung der Zeitbausteine der Kommissionierung

Die Ergebnisse der Versuchsreihe werden im Folgenden hinsichtlich der erfassten Zeitreihen ausgewertet. Jeder Teilnehmer hatte sowohl in der virtuellen Welt als auch in der realen Umgebung nach dem in Kapitel 7 festgelegten Probandenprogramm bzw. Versuchsaufbau Aufträge zu kommissionieren. Dabei wurden die Kommissionierzeiten videotekhnisch erfasst und gemessen.

Abbildung 7-11 stellt die Ergebnisse der Untersuchung bezüglich der gesamten Kommissionierdauer dar. Darin enthalten ist der arithmetische Mittelwert der „Kommissionierzeit gesamt“, berechnet für den realen als auch virtuellen Versuch. Eine Versuchsperson hat in der Realität durchschnittlich ca. $7,2 \pm 1$ Minuten und in der Virtuellen Realität ca. $12,5 \pm 3$ Minuten zur Durchführung aller fünf Aufträge benötigt. Der Wert hinter dem \pm ist die Standardabweichung (s), die ein Maß der Streuung um ihren Mittelwert darstellt. Diese beschreibt die durchschnittliche Abweichung vom arithmetischen Mittel, wobei sich ca. 70% aller Messwerte innerhalb des Intervalls von $\pm s$ befinden [LOH-08]. In folgenden Abbildungen sind die Standardabweichungen durch die waagerechten Striche um das Mittel dargestellt. Ebenfalls enthalten in nachfolgenden Darstellungen sind die maximalen und minimalen Messwerte.

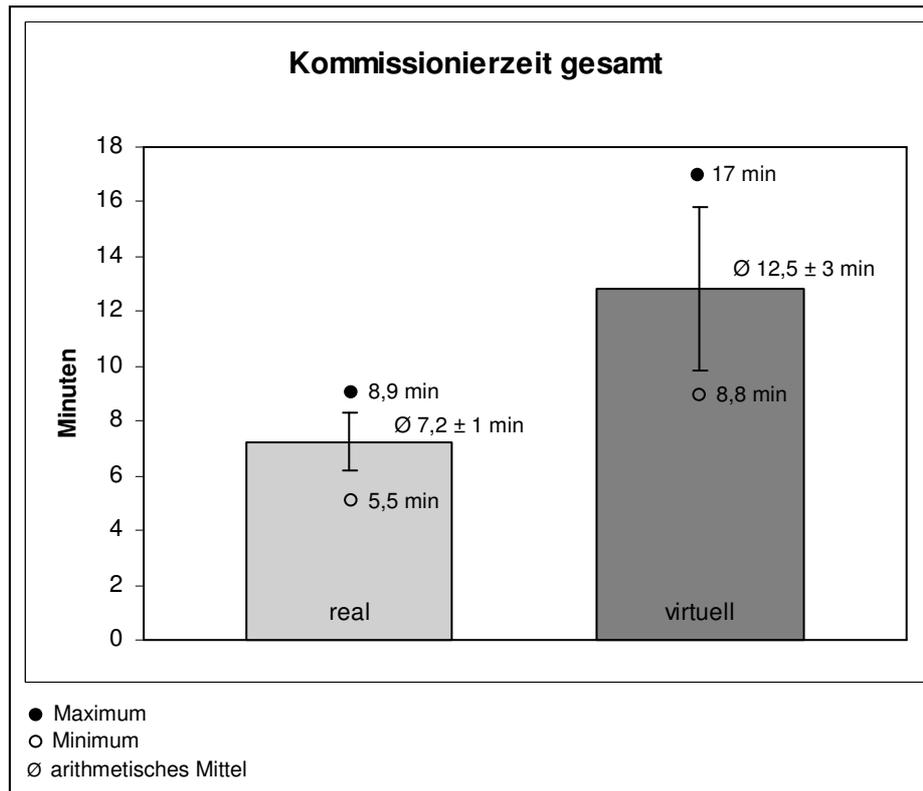


Abbildung 7-11: Durchschnittliche Gesamtkommissionierzeit

Das Diagramm zeigt, dass die Probanden bezugnehmend auf die virtuelle Kommissionierdauer ca. 40% mehr Zeit im Vergleich zur realen Kommissionierung benötigen haben. Anders ausgedrückt hat der Kommissioniersversuch in der Virtuellen Realität im Mittel ca. 1,7-mal so lange gedauert. Auch die Standardabweichung ist im Fall der virtuellen Versuchsreihe größer als die der realen, was bedeutet, dass die Variabilität der virtuellen Messwerte größer ist. Zur Erklärung der Unterschiede in den Zeiten werden die einzelnen Bausteine (Weg-, Greif und Totzeit) genauer untersucht. Dazu werden aus dem Videomaterial der Versuche die Zeitkomponenten mittels eines Zeitnahmesystems und einer Zeitnahmerichtlinie bestimmt. Parallel dazu erfolgt die Verifizierung der vollautomatischen Zeitmessfunktion, die im Demonstrator implementiert wurde, durch Vergleich der aus den Videoaufnahmen gemessenen mit den automatisch erfassten Zeitreihen der virtuellen Kommissioniersversuche. Bei Fehlerfreiheit kann im Rahmen weiterer Versuchsreihen auf die automatisierte Zeiterfassung zurückgegriffen werden und die aufwändige manuelle Zeitbestimmung mittels Videos entfallen.

7.5.1.1 Untersuchung der Totzeit

Das Balkendiagramm in Abbildung 7-12 zeigt die durchschnittlich ermittelten Totzeiten pro Probanden und deren Standardabweichungen. Hierbei ist eine Differenz von etwa 35% zwischen realen und virtuellen Versuchszeiten festzustellen. Insgesamt haben Probanden in der virtuellen Versuchsreihe über alle fünf Aufträge gesehen im Schnitt ca. 1 Minute mehr Totzeit zu verzeichnen. Dies wird auf den relativ ungewöhnten Umgang für die Probanden mit der MI-Simulationsplattform insbesondere zu Beginn der Versuche zurückgeführt. Die Probanden mussten in der Startphase teilweise sehr viel Zeit aufwenden, um sich in der Virtuellen Realität zu orientieren. Alle Versuchspersonen kamen zum ersten Mal mit dieser Technik in Berührung.

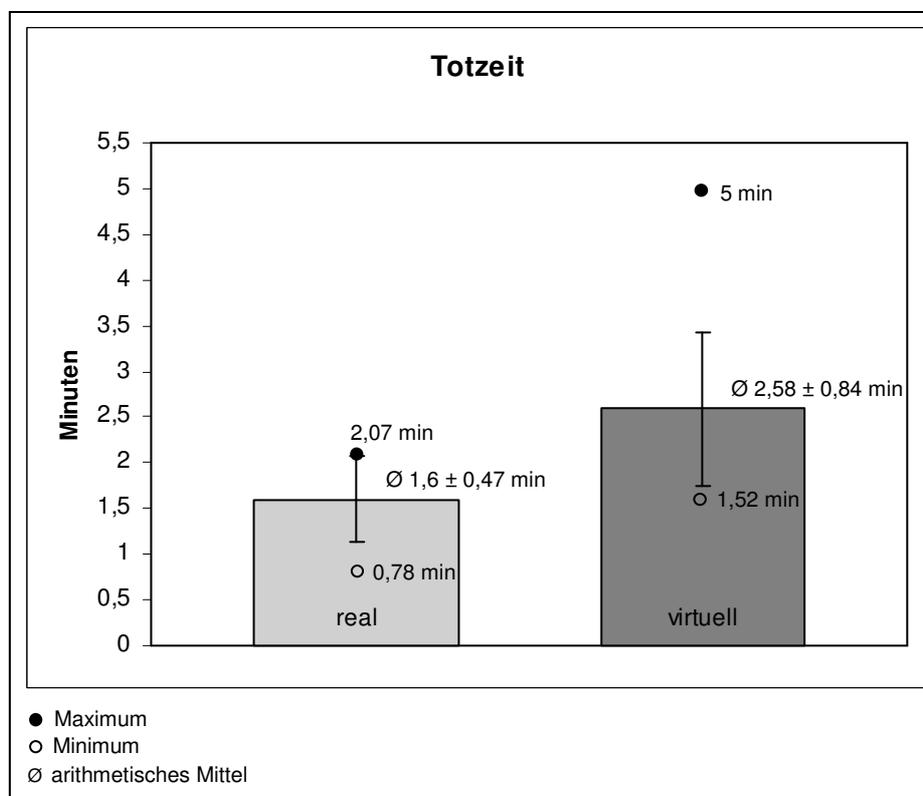


Abbildung 7-12: Durchschnittliche Totzeiten

Wie Abbildung 7-13 darstellt, trat gegen Ende eines jeweiligen Versuchsdurchganges im Rahmen der MI-Simulation ein Gewöhnungseffekt im Umgang mit der Simulatorplattform ein. Das Diagramm zeigt, dass nach längerer Benutzung der Virtual Reality Technik die Differenz zwischen den Stillstandzeiten (Totzeiten) sinkt und die Ergebnisse sich einem realistischen Niveau annähern. Während der Proband im ersten Auftrag durchschnittlich 4 Sekunden mehr Totzeit pro Artikel benötigt hatte, reduzierte sich dies auf 1,5 Sekunden im letzten Auftrag. Auch visuell konnte der Lerneffekt

fekt/Gewöhnungseffekt auf den Videos durch den erkennbar müheloserem Umgang mit der Plattform wahrgenommen werden. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass Personen, die Erfahrung im Umgang mit Computerspielen haben, wesentlich schneller und besser mit der virtuellen Umgebung zurechtkamen (die Probanden wurden mittels Fragebogen nach dem Umgang mit Computerspielen befragt).

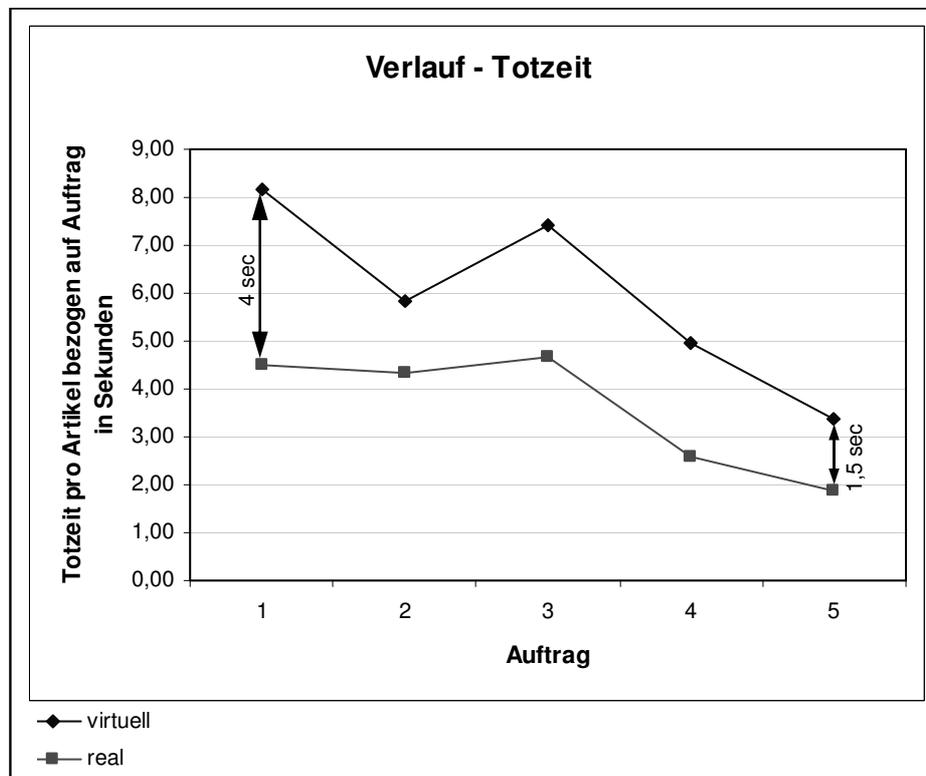


Abbildung 7-13: Verlauf der Totzeit

7.5.1.2 Untersuchung der Wegzeit

Eine Gegenüberstellung der Wegzeiten (siehe Abbildung 7-14) lässt erkennen, dass die Ergebnisse sehr ähnlich sind. Hierbei ist lediglich eine Abweichung von ca. 10% in den Zeiten zwischen realen und virtuellen Versuch festzustellen. Dies lässt darauf schließen, dass das Interaktionsgerät zur Fortbewegung in der Virtual Reality Umgebung intuitiv zu bedienen ist und eine realistische Interaktion zulässt.

Auch an Hand des Verlaufes der durchschnittlichen Wegzeit pro Artikel über die fünf Aufträge lässt sich erkennen, dass die Wegzeiten relativ gut übereinstimmen (siehe Abbildung 7-15). Die Probanden konnten in der Phase des Versuchs gut mit der Bewegungsplattform umgehen und intuitiv durch die virtuelle Welt navigieren. Lediglich vereinzelte Trackingsystemausfälle sorgten zeitweise für eine weniger zufriedenstellende Bedienbarkeit des Laufbandes.

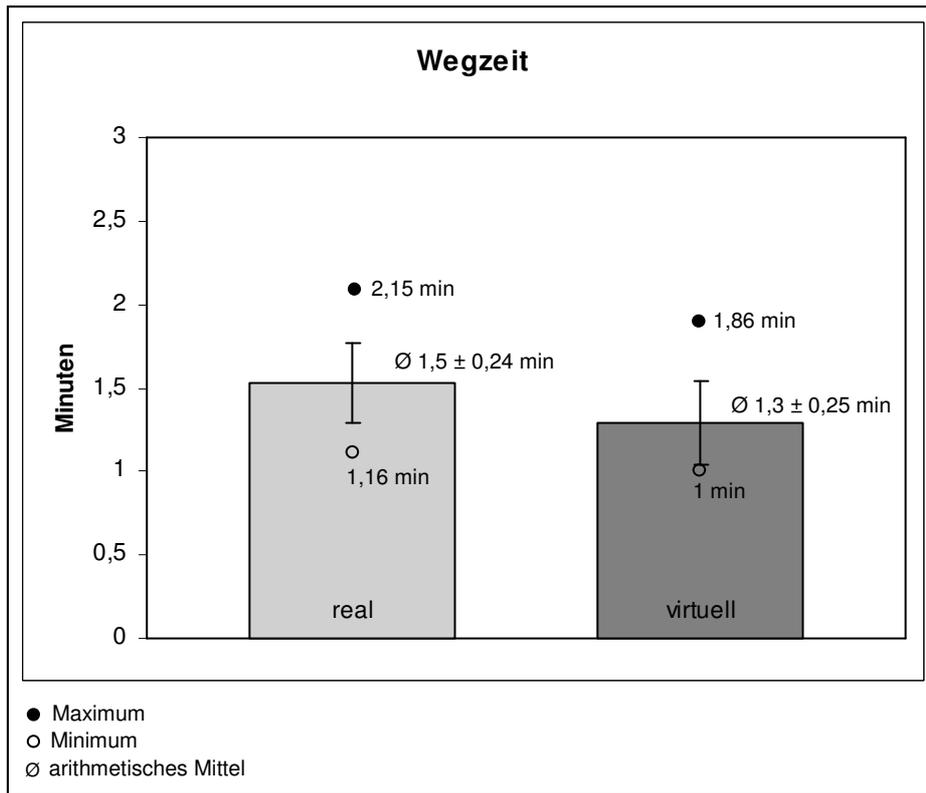


Abbildung 7-14: Durchschnittliche Wegzeiten

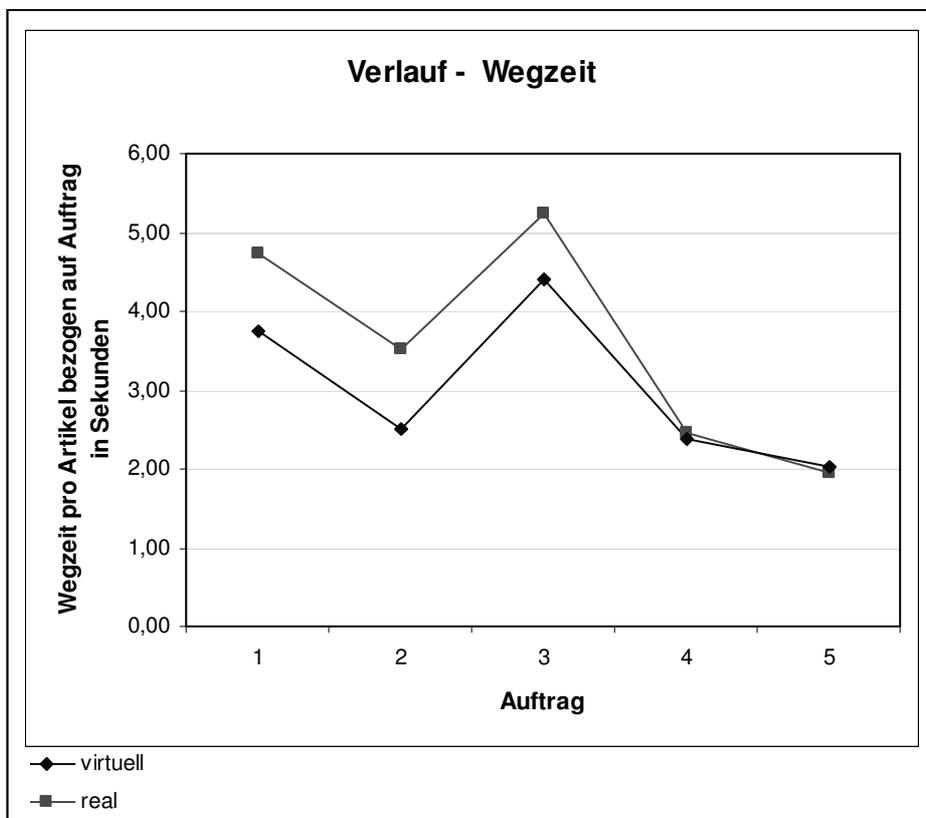


Abbildung 7-15: Verlauf der Wegzeit

7.5.1.3 Untersuchung der Greifzeit

Die größte Differenz zwischen dem realen und dem virtuellen Kommissioniervorgang konnte in den Greifzeiten ermittelt werden (siehe Abbildung 7-16). Während Probanden in der Realität für alle fünf Aufträge durchschnittlich 1,95 min Greifzeit aufwenden mussten, benötigten sie in der Virtuellen Realität fast dreimal solange. Dies ist damit zu begründen, dass in der Virtuellen Realität nur eine Hand zum Kommissionieren verwendet werden konnte, während in der realen Umgebung meist zwei Hände verwendet wurden. Zudem wurden die Artikel in der Realität in die Kommissionierkiste „geworfen“, was in der virtuellen Kommissionierumgebung nicht möglich war. Die Objekte mussten vollständig auf dem Wagen abgelegt werden, was zusätzlich Zeit kostete. Über die Summe der Greifvorgänge ist die relativ hohe Abweichung in den Greifzeiten so plausibel zu erklären. Hier können aber entsprechende Simulatoränderungen Abhilfe schaffen, z.B. durch eine Interaktionsmetapher, die zukünftig das „Werfen“ von Objekten erlaubt.

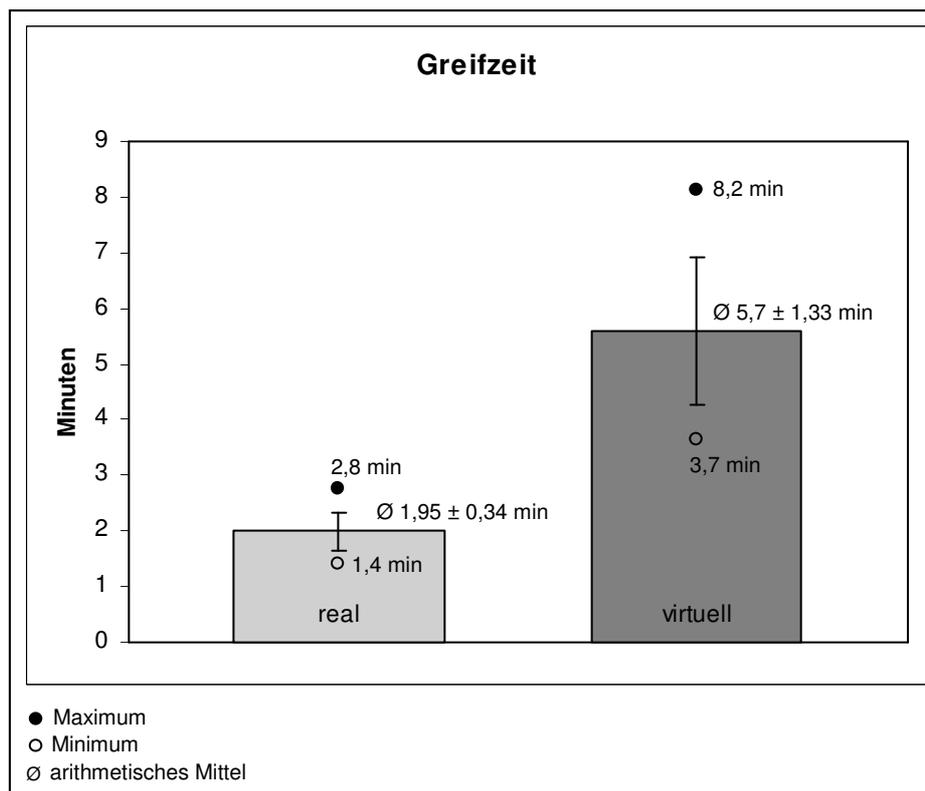


Abbildung 7-16: Durchschnittliche Greifzeiten

Zudem zeigt der Verlauf der Greifzeit (siehe Abbildung 7-17) über die Aufträge, dass der Datenhandschuh besonders zu Beginn des Versuchs nicht intuitiv zu bedienen war und einiger Eingewöhnungszeit bedurfte. Diese Tatsache trägt ebenfalls zu den

Abweichungen in der durchschnittlichen Greifzeit bei. Vereinzelt Tracking-systemausfälle haben zusätzlich für Verwirrung und eine wenig zufriedenstellende Interaktion gesorgt. Damit kann nur nochmals die Wichtigkeit eines problemlos funktionierenden Trackingsystems unterstrichen werden. Um Fehler in der Versuchsauswertung zu vermeiden, wurden die trackingbedingten Zeitnahmefehler (für Weg-, Tot- und Greifzeit) mit Hilfe der Videoaufnahmen bereinigt (siehe auch Abschnitt 7.5.1.4).

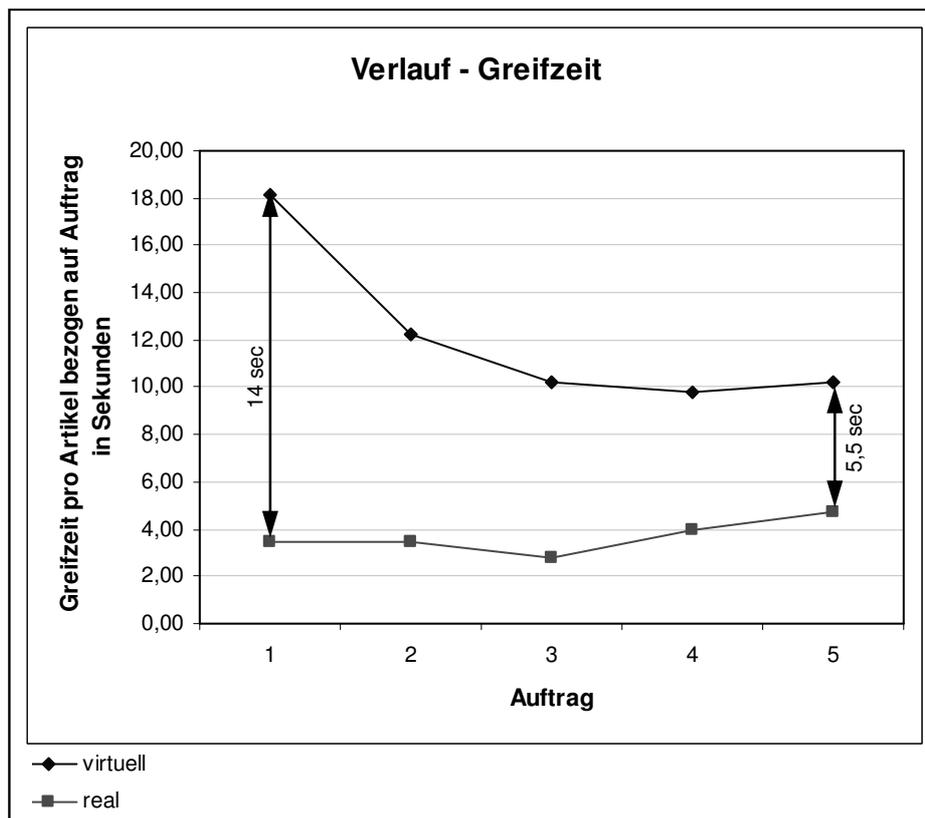


Abbildung 7-17: Verlauf der Greifzeit

7.5.1.4 Verifizierung der automatischen Zeiterfassung

Im Rahmen der Zeitreihenerfassung konnte auch die automatische Zeiterfassungsfunktion der Simulationsplattform verifiziert werden. Abbildung 7-18 zeigt alle Zeitkomponenten mit den aus dem Video der VR-Versuche ermittelten Zeitwerten (Video) und den automatisch erfassten Zeitwerten (Auto). Prinzipiell ist eine Übereinstimmung der Werte zu erkennen. Die geringen Abweichungen, die dem Diagramm zu entnehmen sind, resultieren in erster Linie aus Problemen mit dem Trackingssystem. Dies ist insbesondere beim Wegzeitanteil zu erkennen bzw. zu erklären. Durch vereinzelt Ausfälle des Trackingsystems (bis zu 30 Sekunden) während des „Gehens“ waren einige Probanden nicht in der Lage zu stoppen und dadurch „ge-

zwungen“ auf dem Band weiterzugehen, wobei der Zeitnahmealgorithmus weiterhin Wegzeiten aufgenommen hat. Diese Trackingfehler wurde bei der manuellen Zeitnahme mittels des Videos eliminiert und die tatsächliche Wegzeit ermittelt (Balken mit Beschriftung Video).

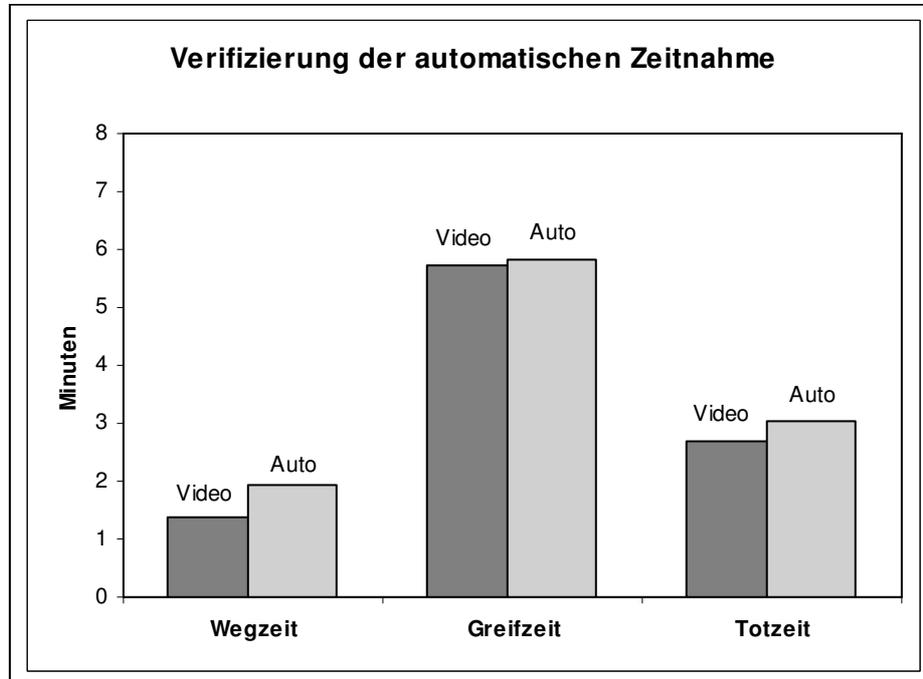


Abbildung 7-18: Verifizierung der automatischen Zeitnahme

Zudem können die Abweichungen der automatischen Zeitnahme und der manuell ermittelten Zeitergebnisse allgemein durch Unschärfen in der Videoauswertung begründet werden. Manuelle Zeitnahmevorgänge im Rahmen der Videountersuchung konnten nicht mit der Exaktheit eines automatischen, computerbasierten Algorithmus durchgeführt werden. Über die Summe der Zeitmessungsvorgänge scheint eine durchschnittliche Abweichung von 5 - 6% als realistisch. Für weitere Versuche kann somit auf die automatisierte Zeiterfassung zurückgegriffen werden, sofern das Trackingsystem fehlerlos funktioniert.

7.5.2 Auswertung der Fragebögen

Neben den im vorangegangenen Abschnitt untersuchten quantitativen Ergebnissen in Form von Zeitstudien konnten auch qualitative Aussagen durch einen Fragebogen gewonnen werden. Jeder Proband musste einen von Psychologen der Ludwigs-Maximilians-Universität München entworfenen Fragebogen am Ende des Versuches

ausfüllen [LMU-07]. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Fragebogenuntersuchung dargestellt.

Das erste Diagramm (siehe Abbildung 7-19) widmet sich der Frage nach der Motivation bzw. Akzeptanz, eine derartige Simulationstechnik in der Logistikplanung einzusetzen. Dabei zeigt sich, dass im Vergleich zur realen Tätigkeit die Testpersonen in der virtuellen Realität mehr Interesse einbrachten und diese Form der Simulation/Schulung empfehlen würden. Diese Aussage spiegelt sich auch in der Untersuchung der kognitiven Belastung wider. Denn nur wenn eine Technik den Menschen nicht überfordert, kann eine Technologie effizient und mit Unterstützung des Einzelnen eingesetzt werden.

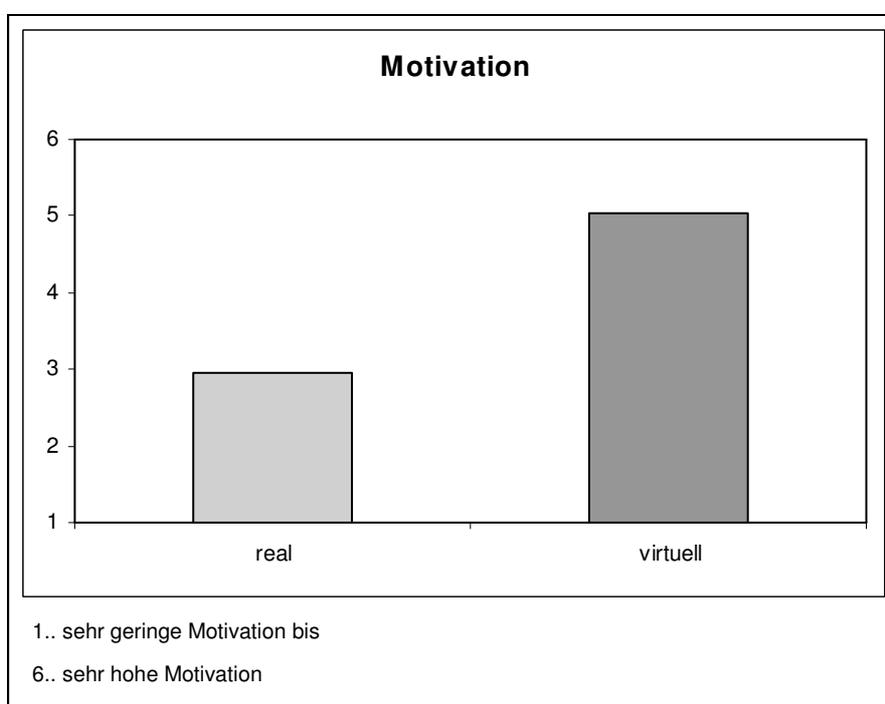


Abbildung 7-19: Motivation

Die kognitive Belastung (siehe Abbildung 7-20) der Versuchspersonen war im Virtuellen wie im Realen in etwa gleich bezüglich physischer und geistiger Anstrengung. Dies zeigt, dass die angebundenen Interaktionsgeräte als sehr intuitiv empfunden wurden und damit eine entsprechende Grundlage für eine realitätsnahe Simulation bilden. Dies stellt eine wesentliche Grundvoraussetzung dar, um die VR-Technologie sinnvoll als Simulationstechnik in der Logistik einsetzen zu können. Erst dadurch wird sichergestellt, dass logistische Prozesse unter besonderer Berücksichtigung des Faktors Mensch detailgetreu in einer VR-Simulation abgebildet und nachvollzogen werden können. Ebenso bestätigte die Tatsache, dass in der virtuellen Welt kein ein-

ziger Proband eine Fehlkommissionierung zu verzeichnen hatte, die Annahme, dass keine kognitive Überbelastung der Versuchspersonen vorlag.

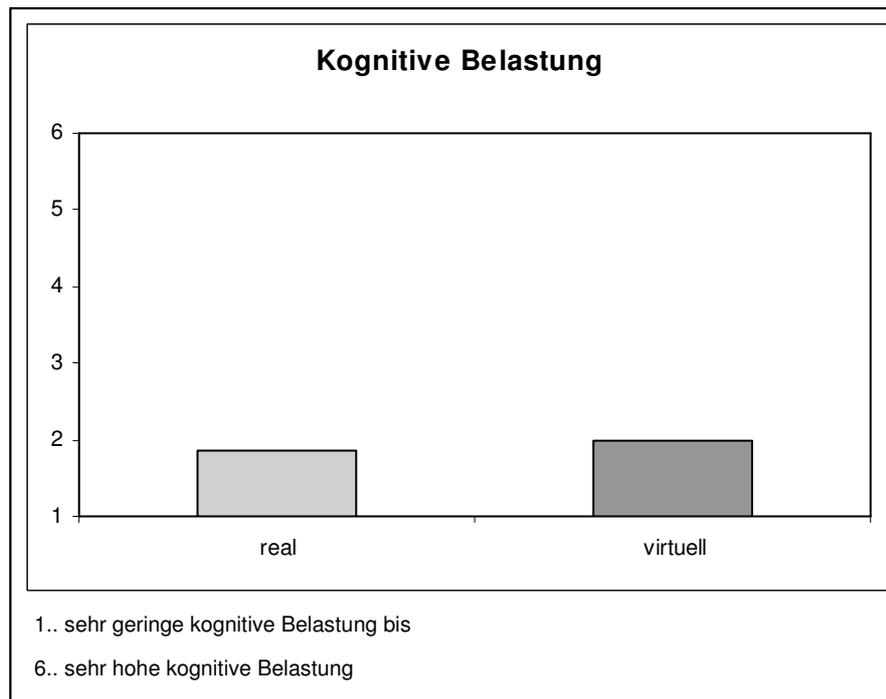


Abbildung 7-20: Kognitive Belastung

Weiter ergab die Probandenbefragung, dass derartige Systeme in informatorischer Hinsicht und insbesondere mit Blick auf die Verbesserung der Kommunikation in interdisziplinären Planungsteams besondere, herausragende Eigenschaften besitzen. So werden Probleme durch die eingängige VR-Darstellung zeitlich schneller erfasst, wodurch auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit verbessert und beschleunigt wird. Besonders fachfremde Personen können sich besser in die vorliegende Problemstellung einarbeiten und diese einfacher in einen übergeordneten Kontext einordnen, wodurch eine gemeinschaftliche, gesamtheitliche Betrachtung der zu lösenden Aufgabe möglich wird. Dies verdeutlicht auch die qualitative Erfassung hinsichtlich der Verständlichkeit und der Wirkung (Realitätsnähe) sowie des Immersionsgrades (Gefühl des Eingebunden seins) (siehe Abbildung 7-21).

Abbildung 7-22 zeigt schließlich die Bewertung der Interaktionsmedien durch den Benutzer. Die Interaktionsgeräte wurden durchgehend gut bewertet. Trotz der Tatsache, dass das Laufband als weniger intuitiv wie der Datenhandschuh eingestuft wurde, ist die Navigation als Gesamtes (Datenbrille und Laufband) positiv bewertet worden. Interessant ist auch, dass der Datenhandschuh trotz der Greifzeitabweichungen als einfach zu bedienendes Interaktionsgerät angesehen wird.

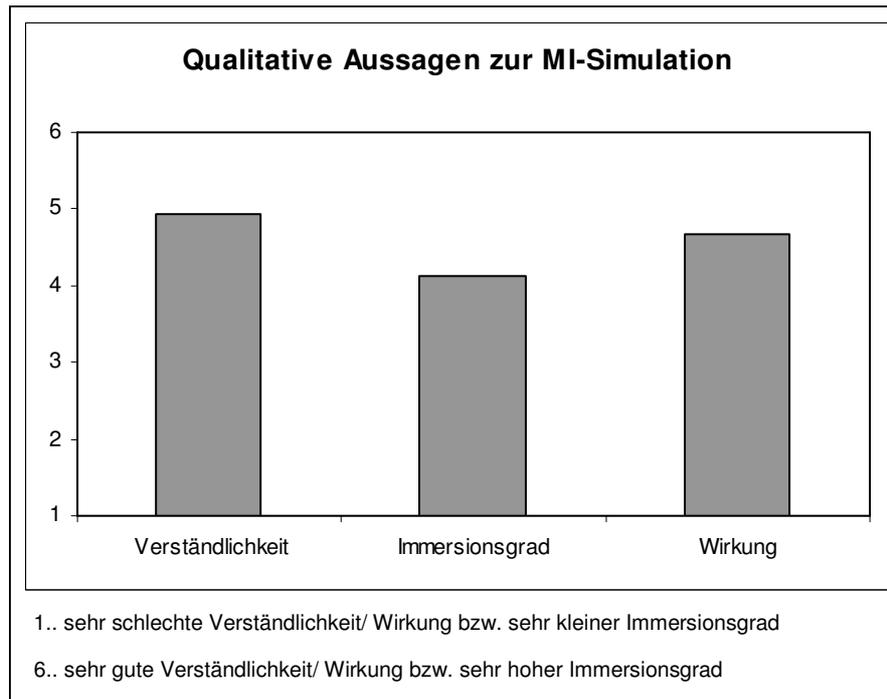


Abbildung 7-21: Qualitative Aussagen zur MI-Simulation

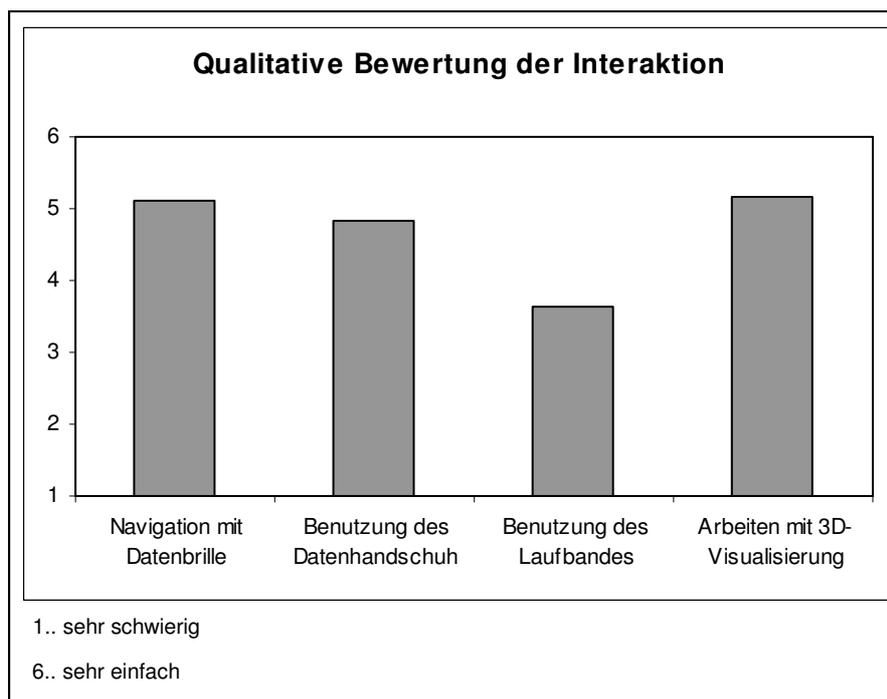


Abbildung 7-22: Qualitative Bewertung der Interaktion

7.6 Ergebnisinterpretation und Schlussfolgerung

In der Einleitung zu diesem Kapitel wurden verschiedene konkrete Fragestellungen formuliert, auf deren Basis die Menschintegrierte Simulation evaluiert wird. Diese gilt

es, im folgenden Abschnitt zu beantworten. Zur Erinnerung sind die Fragen an dieser Stelle nochmals aufgelistet:

- Sind die Interaktionsgeräte intuitiv zu bedienen?
- Können logistische Prozesse/Systeme im Rahmen eines Simulationsmodells realitätsnah abgebildet und simuliert werden?
- Lässt sich der Mensch in die MI-Simulation integrieren?

Im Rahmen der Versuchsauswertung wurden Leistungsparameter (Kommissionierzeiten) in einem virtuellen sowie einem realen Kommissioniersystem ermittelt und einander gegenübergestellt. Die Erkenntnisse bezüglich der Versuchsreihe haben ergeben, dass die Ergebnisse beider Experimente teilweise gut übereinstimmen (z.B. Wegzeit) und eine Ermittlung aussagekräftiger Simulationsergebnisse im Rahmen der MI-Simulation generell möglich ist. An Hand der Kurven von realer und virtueller mittlerer Kommissionierzeit pro Artikel für den entsprechenden Auftrag kann gezeigt werden, dass grundsätzlich vergleichbare Verläufe vorliegen (siehe Abbildung 7-23). Dennoch zeigt das Delta zwischen beiden Verläufen, dass noch Handlungsbedarf in der Verbesserung der MI-Simulationsplattform besteht, um dieses Delta möglichst zu minimieren.

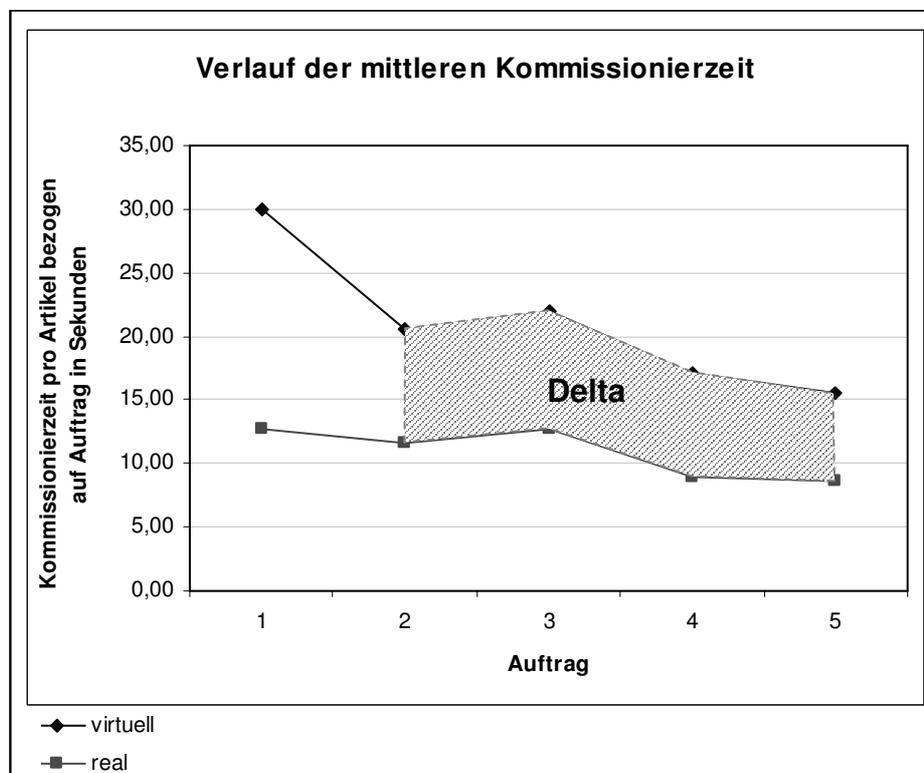


Abbildung 7-23: Verlauf der durchschnittlichen Kommissionierzeit

An erster Stelle steht die weitere Optimierung der Interaktionsgeräte. Insbesondere der Interaktionsmechanismus zur Objektmanipulation mittels Datenhandschuh muss verbessert werden, wie die Differenz in den Greifzeiten aufzeigt. Erst wenn diese eine realistischere Interaktion zulassen, werden die Simulationsergebnisse zusätzlich verbessert. Trotzdem haben die Probanden im Rahmen der Beantwortung der Fragebogen den Interaktionsgeräten ein durchwegs positives Zeugnis ausgestellt. Die Interaktion wurde von den Probanden als intuitiv und wirklichkeitsnah empfunden. Bei einigen Probanden konnten deshalb auch realistische Kennzahlen ermittelt werden. Dabei betrug die Zeitabweichung zwischen real und virtuell ermittelter Gesamtkommissionierzeit des schnellsten Probanden der MI-Simulation ca. 20% (7 Minuten real und 8,8 Minuten virtuell). In Tests mit geübten Personen, die außerhalb der Versuchsreihe erfolgten, konnten Kommissionierzeiten von ca. 6 Minuten im Rahmen der MI-Simulation erreicht werden. Im Vergleich dazu benötigte die schnellste Versuchsperson des realen Versuches ca. 5,5 Minuten zur Kommissionierung. Prinzipiell lässt sich festhalten, dass die entwickelten Interaktionsmedien intuitiv zu bedienen sind. Dennoch ist eine Verbesserung der Interaktion anzustreben, um genauere Simulationsergebnisse für Planungszwecke zu erhalten.

Bezüglich des Simulationsmodells (Logik und Geometrie) hat sich ergeben, dass dieses eine verhältnismäßig realistische Abbildung bzw. Simulation der Wirklichkeit darstellt. Die Fragebogenauswertung zeigt, dass die Probanden die Simulation als real empfanden und sich entsprechend in die virtuelle Welt eingebunden fühlten. Logistische Systeme/Prozesse können mit Hilfe der MI-Simulation demnach realitätsnah simuliert werden. Trotzdem gilt es auch hier, eine Optimierung in Kombination mit den Interaktionsgeräten anzustreben, damit entsprechend realistischere Kennzahlen ermittelt werden können.

Letztlich haben Faktoren wie geringe kognitive Belastung und hohe Motivation/Akzeptanz der teilnehmenden Personen gezeigt, dass sich der Mensch auf die MI-Simulation einlassen und dementsprechend in die Simulation integriert werden kann. Auf die Ja/Nein Frage, ob sich der Proband als Bestandteil der virtuellen Umgebung fühlt, haben 83% der Befragten mit Ja geantwortet.

Die Untersuchung der verschiedenen Fragestellungen am Beispiel der Kommissionierung hat gezeigt, dass prinzipiell eine realistische Simulation mittels der Virtuellen Realität unter Einbeziehung des Menschen möglich ist. Um den Ansatz der MI-Simulation in der Planung zur Reife zu bringen, sind jedoch noch weitere Optimie-

rungen insbesondere in Hinblick auf die Interaktionsgerätschaften vorzunehmen. Zusätzlich sind weiterführende Konzepte zu entwickeln, um die Simulationsplattform sukzessive zu verbessern.

Folgende wesentliche Punkte können bezüglich der Menschintegrierten Simulation am Ende der Untersuchungen auf Basis der Beobachtungen und der Probandenbefragung festgehalten werden:

- Die Akzeptanz für den Einsatz einer derartigen Simulationstechnik in der Planung ist sehr hoch.
- Der Einsatz der VR-Technologie wirkt sich positiv auf die Motivation im Rahmen der Planung/Schulung aus.
- Die kognitive Belastung der Benutzer ist als sehr gering anzusehen, was darauf schließen lässt, dass eine realitätsnahe Simulation unter Einbeziehung des Menschen möglich ist.
- Alle Versuchspersonen erwarten sich durch den Einsatz der VR-Technik eine wesentliche Leistungssteigerung in der Logistiksystemplanung und letztlich im Betrieb logistischer Systeme.
- Eine realistische Ermittlung logistischer Leistungsparameter wie beispielsweise Wegzeiten und ähnliches ist prinzipiell möglich.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Handhabung der rasant zunehmenden Informationsflut in den heutigen Unternehmensprozessen sowie die zunehmende Atomisierung der Transporteinheiten sind mit herkömmlichen Mitteln kaum noch beherrschbar. Herkömmliche Methoden gelangen schnell an ihre Grenzen und behindern einen effizienten Ablauf der Prozesse. Zusätzlich steigt der Druck immer bessere, günstigere aber dennoch qualitativ hochwertige Produkte in kürzerer Zeit zu produzieren und an den Kunden zu liefern. Diese Entwicklung hat immense Auswirkungen auf die Logistik, insbesondere die Kommissioniersysteme und nicht zuletzt auf deren Planung. So muss schon die Phase der Planung schneller, besser und effizienter gestaltet werden, um konkurrenzfähige Systeme zu entwickeln. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommen in den Unternehmen zunehmend neue Technologien (CAD, Simulation, ERP etc.) zum Einsatz, die einen einfacheren Umgang mit komplexen Aufgaben ermöglichen.

Eine zurzeit viel versprechende Technologie ist die Virtual Reality (VR). Durch geeignete Geräte kann eine virtuelle, dreidimensionale Umgebung erzeugt werden, die es ermöglicht, dem Menschen eine Vielzahl von Informationen zu vermitteln. Dies ist deshalb erreichbar, weil die dreidimensionale Darstellung besser in das menschliche Vorstellungsvermögen passt und die Informationen nicht mühsam dekodiert werden müssen wie beispielsweise bei einer Schrift. Ein besonders wichtiger Aspekt der VR ist die Integration des Faktors Mensch in bisher ungekannter Weise durch die Nutzung innovativer, intuitiver Interaktionsmechanismen. Diese ermöglichen es dem Anwender dieser Technologie, unter quasi realistischen Bedingungen in der virtuellen Welt zu arbeiten, diese explorativ zu erkunden und zu erfahren.

Für die Planung von Produktions-, Logistik-, oder Kommissioniersystemen ergeben sich durch die Anwendung dieser noch jungen Technik viele Vorteile. Es können noch vor der Realisierung Systeme umfangreich überprüft und somit Fehler, deren Behebung zu einem späteren Zeitpunkt erheblich teurer wäre, schon beim Entwurf behoben werden. Die Folge ist ein sicherer und schnellerer Entwicklungsprozess, was einem Unternehmen Wettbewerbsvorteile bringt bzw. die Produktivität steigert.

Besonders interessant ist die Virtuelle Realität einzusetzen, wo durch den Menschen beeinflusste Faktoren zu Ungenauigkeiten führen. Hier sind numerische bzw. diskre-

te Simulationen nicht zufriedenstellend. Um die Unschärfe, die durch den Menschen im Prozess entsteht, in den Griff zu bekommen, wird der Mensch im Rahmen des neu entwickelten Simulationsverfahrens in eine virtuelle Umgebung eingebunden. Der aus dem Forschungsprojekt ForLog (Supra-adaptive Logistiksysteme) hervorgegangene und mit dem Namen „Menschintegrierte Simulation“ bezeichnete neue Ansatz ermöglicht es, den Humanfaktor ohne Schätzwerte aus Tabellen oder sonstiger Methoden in der Planung zu berücksichtigen und in der ihm gebührenden Weise zu beachten. So spielt der Mensch in der Kommissionierung sowohl als planende als auch als operative Instanz eine zentrale Rolle. Trotz aller Automatisierungsbestrebungen ist der Mitarbeiter in der Kommissionierung auf Grund seiner kognitiven und geschicklichen Eigenschaften in absehbarer Zeit nicht mit vertretbarem Aufwand zu ersetzen. Aus diesem Grund wurde die Kommissioniersystemplanung als Beispielszenario herangezogen und eine entsprechende Simulationsplattform entwickelt, die das komplexe, soziotechnische Zusammenspiel (Ergonomie, Layout etc.) zwischen Mensch und Technik abbildet. Virtuelle Kommissionierumgebungen, die schnell und aufwandsarm mittels CAD-Techniken zu erstellen sind, lassen sich im Cyberspace „begehen“ und Kennzahlen können unter realistischen Randbedingungen zur Leistungsbewertung geplanter Systeme erstmals bereits im Labor ermittelt werden. Hierzu wurden innovative Mensch-Maschine-Schnittstellen, wie ein Datenhandschuh und eine unidirektionale Bewegungsplattform (z.B. Laufband) zur Begehung virtueller Welten in ein VR-System integriert. Durch die Interaktion des Benutzers mit der virtuellen Umgebung in einem echtzeitfähigen VR-Simulationsmodell können beispielsweise Wegzeiten, Greifzeiten bzw. Fehlerquoten in der Kommissionierung etc. noch bevor ein reales System existiert in den unterschiedlichsten Szenarien ermittelt werden, ohne einen Logistikmitarbeiter in einer Simulation abbilden zu müssen. Der Mensch selbst bringt seine Eigenschaften und Verhalten in das VR-Simulationsmodell ein und ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung. In der Kommissionierung können so z.B. – angefangen von der Auftragsentgegennahme bis zum Pickvorgang – Prozesse komplett abgebildet und unter arbeitstechnischen, systemtechnischen, geometrischen und ergonomischen Gesichtspunkten evaluiert werden. Die Technik der Menschintegrierten Simulation wurde in einer Testreihe erprobt und evaluiert. Hierzu mussten Probanden Kommissioniervorgänge sowohl in einem virtuellen Modell als auch in der Realität nachvollziehen. Dabei wurde das virtuelle Kommissioniersystem möglichst exakt der realen Anlage nachempfunden, um die Versu-

che bzw. die Versuchsergebnisse miteinander in Beziehung setzen zu können. Konkret wurden die logistischen Kennzahlen (Weg-, Greif- und Totzeiten) zu Evaluierungszwecken verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die in der Virtuellen Realität ermittelten Kennzahlen als realistischer Gradmesser zur Leistungsbewertung herangezogen werden können. Mit Hilfe eines von Psychologen erstellten Fragebogens wurde eine Belastungsanalyse durchgeführt, die ergab, dass die kognitive Belastung im Umgang mit der virtuellen Kommissionierung nahezu identisch mit der Belastung einer realen Kommissionierung ist. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Menschintegrierte Simulation und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten erfolgreich umgesetzt wurde. Letztlich stellte sich auch noch der „Spaßfaktor“ bei den Probanden ein, der sich in einer hohen Motivation im Umgang mit dieser neuen Technologie niederschlug. Dies wird ebenso als großer Pluspunkt gewertet, da Probleme, je motivierter die beteiligten Parteien sind, besser gelöst werden können.

Im Rahmen dieser Forschung wurden die Grundlagen für die Entwicklung eines neuen Planungsverfahrens für die Gestaltung logistischer Systeme insbesondere manueller Kommissioniersysteme gelegt. Die dabei erarbeiteten Ergebnisse können Anstoß für Verfahrensverbesserungen bezüglich der Planungsprozesse mit sich bringen, aber auch als Ausgangspunkt zur Erschließung weiterer Anwenderszenarien dienen. Zudem erhält der Nutzer die Möglichkeit, seine kreativen Ideen in der Virtuellen Realität ohne großen Aufwand zu erproben, wodurch neue Ansätze in der Kommissionierung entstehen können, die zu einer Verbesserung der Prozesse führen.

Durch eine zusätzliche Optimierung des gesamten Demonstrators wird es künftig möglich sein, realistische Planungserkenntnisse im Rahmen einer Menschintegrierten Simulation in der Logistik durch den Einsatz der Virtuellen Realität zu erhalten. Diesbezüglich könnten beispielsweise CAVE-Systeme mit noch in der Entwicklung befindlichen zweidimensionalen Bewegungsplattformen zum Einsatz kommen. Dies gilt es, in weiteren Studien zu vertiefen und durch eine konsequente Weiterentwicklung der Simulationsumgebung so die Ergebnisqualität deutlich zu verbessern. Dazu muss der Demonstrator zur Menschintegrierten Simulation mit den gewonnenen Erkenntnissen sukzessive verbessert werden.

9 Literaturverzeichnis

- [5DT-08] Fifth Dimension Technologies:
Internetauftritt der 5DT GmbH.
Internet: <http://www.5dt.com/hardware.html#glove>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [ALT-02] Alt, T.:
Augmented Reality in der Produktion.
München: Herbert Utz Verlag, Dissertation, 2002.
- [ARN-05] Arnold, D.; Furmans, K.:
Materialfluss in Logistiksystemen.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- [ART-07] Advanced Realtime Tracking:
Internetauftritt der A.R.T. GmbH.
Internet: <http://www.ar-tracking.de/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2007.
- [BGE-08] Berufsgenossenschaft Einzelhandel:
Internetauftritt der Berufsgenossenschaft Einzelhandel.
Internet: <http://www.bghw.de/>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [BLU-06] Blutner, D.; Cramer, S.; Haertel, T.:
Der Mensch in der Logistik: Planer, Operateur und Problemlöser.
Dortmund: Universität Dortmund, 2006.

- [BOR-94] Bormann, S.:
Virtuelle Realität – Genese und Evaluation.
Bonn: Addison-Wesley Verlag, 1994.
- [BOW-05] Bowman, D. A.; Kruijff, E.; LaViola, J.; Poupyrev, I.:
3D User Interfaces – Theory and Practice.
Boston: Addison-Wesley Verlag, 2005.
- [BRA-02] Bracht, U.; Fahlbusch, M.:
Fabrikplanung mit Virtual Reality.
In: ZWF 96 (2001) H. 1-2, S. 20 – 26.
Clausthal: TU Clausthal, 2002.
- [BUR-94] Burdea, G.; Coiffet, P.:
Virtual Reality Technology.
New York: John Wiley & Sons Verlag, 1994.
- [EVE-00] Eversheim, W.; Luczak, H.:
Industrielle Logistik.
Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz in Aachen, 2000.
- [GAM-08] GameDev.net:
Internetauftritt GameDev.net:
Internet: <http://www.gamedev.net/reference/articles/article1234.asp>, zuletzt abgerufen am 23.04.2008.
- [GUD-04] Gudehus, T.:
Logistik 1 - Grundlagen, Verfahren und Strategien.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2000.
- [GÜN-07a] Günthner, W. A.:
Vorlesungsskript Materialfluss und Logistik.
München: Lehrstuhl fml, TU München, 2007.

- [GÜN-07b] Günthner, W. A.:
Vorlesungsskript Materialflusstechnik.
München: Lehrstuhl fml, TU München, 2007.
- [GÜN-07c] Günthner, W. A.:
Vorlesungsskript Planung technischer Logistiksysteme.
München: Lehrstuhl fml, TU München, 2007.
- [GÜN-07d] Günthner, W. A. (Hrsg.):
Neue Wege in der Automobillogistik.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007.
- [HEI-06] Heinecker, M.:
Planung von modularen Materialflusssystemen.
München: Herbert Utz Verlag, Dissertation, 2006.
- [ICI-08] ICIDO:
Internetauftritt der ICIDO GmbH.
Internet: <http://www.icido.de/>, zuletzt abgerufen am
07.01.2008.
- [IFF-05] Schenk, M. (Hrsg.):
Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen
und Betreiben technischer Systeme.
In: Tagungsband der 8.IFF-Wissenschaftstage.
Magdeburg: Universität Magdeburg, 2005.
- [IMS-08] Imsys:
Internetauftritt der Imsys GmbH.
Internet: <http://www.imsys-vr.de/>, zuletzt abgerufen am
14.01.2008.

- [INI-08] Inition:
Internetauftritt der Inition Ltd.
Internet: <http://www.inition.com/>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [IPA-06] Fraunhofer IPA:
Internetauftritt des Fraunhofer IPA.
Return on Investment von Virtueller Realität.
Internet:
<http://www.ipa.fraunhofer.de/Arbeitsgebiete/digitalefabrik/vr/roi.php>, zuletzt abgerufen am 31.08.2007.
- [IFT-07] Wehking, K.-H.:
Gefahrsituationen besser beherrschen.
In: Hebezeuge Fördermittel (Ausgabe 3), S. 122 – 123.
Berlin: Huss Verlag, 2007.
- [JVR-08] Journal of Virtual Reality and Broadcasting:
Internetauftritt der JVRB.
Internet: <http://www.jvrb.org/>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [KLA-04] Klaus, P. (Hrsg.); Krieger, W. (Hrsg.):
Logistik Lexikon (3. Auflage).
Wiesbaden: Gabler Verlag, 2004.
- [KLE-88] Klebe, I.; Klebe, J.:
Durch die Augen in den Sinn.
Köln: Aulis Verlag, 1988.
- [LAM-08] Lehrstuhl für Angewandte Mechanik der TU München:
Internetauftritt des Lehrstuhls für Angewandte Mechanik.
Internet: <http://www.amm.mw.tum.de/index.php?id=250>, zuletzt abgerufen am 08.01.2008.

- [LMU-07] Ludwig-Maximilians-Universität München - Lehrstuhl für pädagogische Psychologie:
Fragebogen zur Kommissioniersuchsreihe.
München: Ludwig-Maximilians-Universität, 2007.
- [LOH-08] Lohninger, H.:
eBook - Grundlagen der Statistik.
Internet: http://www.statistics4u.com/fundstat_germ/index.html, zuletzt abgerufen am 22.01.2008.
- [LRZ-08] Leibniz Rechenzentrum München:
Internetauftritt des LRZ München.
Internet: <http://www.lrz-muenchen.de/>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [MAN-00] Manocha, D.:
Interactive Walkthroughs of Large Geometric Datasets.
In: Proc. Of AMC Siggraph.
USA: 2000.
- [MIC-08] UM3D-Lab – University of Michigan:
Internetauftritt des UM3D-Lab.
Internet: <http://um3d.dc.umich.edu/projects/sensics/index.html>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [MIL-99] Milgram, P.; Takamura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.:
Augmented Reality – A Class of displays on the reality-virtuality continuum. 1999.
- [ONG-04] Ong, S. K. (Hrsg.); Nee, A. Y. C. (Hrsg.):
Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing.
London: Springer Verlag, 2004.

- [RSI-08] RSI:
Internetauftritt der RSI GmbH.
Internet: <http://www.rsi-gmbh.de/public/de/prod/hard/cybergrasp.htm>, zuletzt abgerufen am 23.03.2008.
- [RUN-07] Runde, Ch.:
Konzeption und Einführung von Virtueller Realität als Komponente der Digitalen Fabrik in Industrieunternehmen.
Stuttgart: Universität Stuttgart, Dissertation, 2007.
- [SCH-05] Schenk, M.; Wirth, S.:
Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Methoden für wandlungsfähige und vernetzte Fabrik.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005.
- [SCH-08] Schiess:
Internetauftritt der Schiess GmbH.
Internet: <http://www.schiess.de/deu/startseite.php>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.
- [SYM-00] Symietz, M.:
Echtzeitbasierte Generierung und Verlegung von Leitungsobjekten in einem digitalen Fahrzeugmodell mit einem Virtual-Reality-System.
Bielefeld: Universität Bielfeld, Dissertation, 2000.
- [TUH-08] Technische Universität Hamburg-Harburg:
Internetauftritt der TUHH.
Internet: <http://www.pmt.tu-harburg.de/vr/index.html>, zuletzt abgerufen am 14.01.2008.

- [VDI-2385] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.):
VDI 2385: Leitfaden für die Materialflussgerechte Planung
von Industrieanlagen.
Berlin: Beuth Verlag, 1998.
- [VDI-2411] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.):
VDI 2411: Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen.
Berlin: Beuth Verlag, 1978.
- [VDI-2860] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.):
VDI 2860: Montage und Handhabungstechnik; Handha-
bungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Defi-
nitionen, Symbole.
Berlin: Beuth Verlag, 1982.
- [VDI-3633] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.):
VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Pro-
duktionssystemen - Grundlagen.
Düsseldorf: VDI Verlag, 2000.
- [VDI-4499] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.):
VDI 4499: Digitale Fabrik – Grundlagen.
Düsseldorf: VDI Verlag, 2007.
- [VIR-08] Virtosphere, Inc.:
Internetauftritt der Virtosphere Inc.
Internet: <http://www.virtosphere.com/>, zuletzt abgerufen am
01.01.2008.
- [VOG-97] Vogt, G.:
Das neue Kommissionierhandbuch.
In: Sonderpublikation der Zeitschrift Materialfluss.
Landsberg: Verlag moderne Industrie, 1997.

- [VSD-08] Virtual Space Devices:
Internetauftritt der Virtual Space Devices Inc.
Internet: <http://www.vsd.bz/>, zuletzt abgerufen am
14.01.2008.
- [WES-06] Westkämper, E.; Runde, Ch.:
Anwendungen von Virtual Reality in der Digitalen Fabrik –
eine Übersicht.
In: wt Werkstattstechnik online 96 (2006) Heft 3, S. 99 – 103.
Berlin: Springer Verlag, 2006.
- [WIE-02] Wiendahl, H.-P.; Fiebig, C.; Harms, T.:
Die Digitale Fabrik – Mehrwert in der Fabrikplanung durch den
Einsatz von VR.
In: Tagungsband „Die Digitale Fabrik – Mit Virtual Reality und
Simulationstechnik zur erfolgreichen Produktion von morgen“.
Büren: Workshop der Unity AG, 2002.
- [WIK-08a] Wikipedia:
Begriff - Visuelle Wahrnehmung.
Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Visuell> , zuletzt abgeru-
fen am 01.01.2008.
- [WIK-08b] Wikipedia:
Begriff - Haptische Wahrnehmung.
Internet: [http://de.wikipedia.org/wiki/Haptische_ Wahrneh-](http://de.wikipedia.org/wiki/Haptische_Wahrnehmung)
mung, zuletzt abgerufen am 01.01.2008.
- [WIK-08c] Wikipedia:
Begriff - Computercluster.
Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Computercluster>, zuletzt
abgerufen am 01.01.2008.

- [WIK-08d] Wikipedia:
Begriff - Anwendungsfalldiagramm.
Internet:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Anwendungsfalldiagramm>, zuletzt
abgerufen am 01.01.2008.
- [ZÄH-04a] Zäh, M.F.; Egermeier, H.; Petzold, B.; Schmid, H.:
Haptic Interaction with a Glove Interface in a Physics Based
Virtual Environment.
In: Proceedings of the IEEE ICAT 2004, S. 150 - 155.
Seoul, Korea: 2004.
- [ZÄH-04b] Zäh, M.F.; Egermeier, H.; Petzold, B.; Spitzweg, M.:
Dexterous Object Manipulation in a Physics Based Virtual
Environment.
In: Proceedings of Mechatronics & Robotics 2004, S. 1340 -
1344.
Aachen: 2004.
- [ZÄH-05] Zäh, M. F.; Müller, N.; Aull, F.; Sudhoff, F.:
Digitale Planungswerkzeuge.
In: wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Heft 4, S. 175 - 180.
Berlin: Springer Verlag, 2005.