

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science

Trackingvarianten für Augmented Reality Kommissioniersysteme

vorgelegt von:
Daniel Heily, BSc.

Matrikelnummer:
0935294

Studienrichtung:
Industrielogistik

Betreuer:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Auer



Verfasst am Institut für Informationstechnologie
der Montanuniversität Leoben.

Leoben, im Oktober 2014

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Auswahl geeigneter Trackinglösungen für ein „Augmented Reality Kommissioniersystem“. Das bestehende System ist bereits in der Lage, den Kommissionierer durch ein Lager zu navigieren, sowie Lagerplätze der zu entnehmenden Waren anzuzeigen. Ziel ist es, eine Trackinglösung auszuwählen, die es dem System erlaubt, den Kommissionierer auch bei der Ablage eines Kartons auf der Zielpalette zu unterstützen. Dabei soll die Ablageposition des Kartons augmentiert werden. Das Trackingsystem muss somit die Pose (Position und Orientierung) des Kopfes der Person in Echtzeit verfolgen. Zudem ergeben sich hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit. Um die Korrektheit der Ablage eines Kartons auf der Zielpalette zu verifizieren, soll das System mit einer automatischen Ablagekontrolle gekoppelt werden. Ein Prototyp eines derartigen Kontrollsystems wurde im Zuge dieser Masterarbeit entwickelt.

Im Theorieteil werden, basierend auf Fachliteratur, jene Trackingtechnologien vorgestellt, die für den beschriebenen Anwendungsfall aus technologischer Sicht in Frage kommen. Darauf aufbauend sind in Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Anbietern von Trackinglösungen konkrete Lösungsszenarien erstellt worden. Jene Szenarien sind in dieser Arbeit beschrieben und wurden mit Hilfe des „Analytical Hierarchy Process“ sowie der Nutzwertanalyse evaluiert.

Der Prototyp für die Ablagekontrolle wurde mittels einer Tiefenbildkamera (Microsoft Kinect) realisiert. Das System ist in der Lage, die Ablageposition eines Kartons auf der Zielpalette zu verifizieren. Der dafür entwickelte Algorithmus ist ebenfalls in dieser Arbeit beschrieben. Zudem wurden Tests bezüglich der Messgenauigkeit des Systems durchgeführt.

Abstract

This master thesis deals with the selection of a suitable tracking solution for an “augmented reality picking system“. The existing system is able to navigate the picker through a warehouse and to guide him to the right storage locations. The new tracking solution shall support the picker while putting a box on the pallet by augmenting the correct position. Such a tracking system has to be capable of tracking the pose (position and orientation) of the person's head in real time. For precise augmentation it has to fulfil high accuracy requirements. To verify the storage position of a box on the pallet, the picking system needs to be linked with an automatic control system. A prototype of such a system has been developed. The theoretical part of this thesis describes those tracking technologies, which qualify for the described task from a technical point of view. In cooperation with various tracking system providers, concrete solution scenarios were developed. These scenarios were evaluated using the “Analytical Hierarchy Process“ and a cost-benefit analysis.

For developing the prototype of the control system, which checks the storage position of a box on the pallet, a depth image camera (Microsoft Kinect) was used. The developed algorithm for identifying a box and checking its position is described. Furthermore test results on the measurement accuracy are reported.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Problemstellung	1
2 Pick by Vision	3
2.1 Kommissionierung	3
2.1.1 Der Aufbau eines Kommissioniersystems	4
2.1.2 Informationstechnische Kommissionierführung	4
2.1.3 Kennzahlen	5
2.2 Augmented Reality	6
2.2.1 Definition Virtual Reality	6
2.2.2 Reality - Virtuality Continuum	6
2.2.3 Definition Augmented Reality	7
2.2.4 Die Struktur eines AR-Systems	8
2.2.5 Anwendungsgebiete von AR	9
3 Trackingtechnologien und Grundlagen	10
3.1 Trackingaufgabe	10
3.1.1 Anforderungen an die Trackinggenauigkeit	11
3.2 Trackingtechnologien	14
3.3 Optische Systeme	15
3.3.1 Referenz auf 3D Modelle	15

3.3.2	Referenz auf Bilder	16
3.3.3	Referenz auf Marker	16
3.3.4	Referenz auf projizierte Ziele	16
3.3.5	System ohne Referenz	17
3.3.6	Referenz von anderen Sensoren	17
3.3.7	Anwendbarkeit und verfügbare Produkte	19
3.4	Infrarot	20
3.4.1	Natürliche Infrarot (IR) Strahlung	20
3.4.2	Künstliches IR Licht	20
3.4.3	Anwendbarkeit und verfügbare Produkte	22
3.5	Ultraschall	23
3.5.1	Aktive Ultraschall Systeme	24
3.5.2	Passive Ultraschall Systeme	25
3.5.3	Anwendbarkeit und verfügbare Produkte	26
3.6	Magnetische Systeme	28
3.6.1	Durch Gleichstrom erzeugte Magnetfelder	28
3.6.2	Durch Wechselstrom erzeugte Magnetfelder	29
3.6.3	Permanentmagnete	29
3.6.4	Anwendbarkeit und verfügbare Produkte	30
3.7	Kombinierte Polare Systeme	30
3.7.1	iGPS	31
3.7.2	Anwendbarkeit und verfügbare Produkte	32
4	Evaluierung Trackingvarianten	33
4.1	Definition der Evaluierungskriterien	36
4.1.1	Technische und funktionale Bewertung	36
4.1.2	Technische Systemeigenschaften	38
4.1.3	Kostenbetrachtung	39
4.1.4	Ergonomie	39
4.1.5	Trackingsystem am Flurförderfahrzeug (FFZ)	40
4.1.6	Design	41
4.1.7	IT-technische Aufwände nach Aufgabenfeldern	41
4.1.8	Arbeitssicherheit und Arbeitstauglichkeit	42
4.2	Der Analytical Hierarchy Process (AHP)	42
4.2.1	Berechnung der Kriteriengewichte	43
4.2.2	Gruppenentscheidung	46
4.2.3	Bewertung der Alternativen	46
4.2.4	Ermittelte Kriteriengewichte	47
4.3	Lösungsansätze - Evaluierungskandidaten	49
4.3.1	NFT / Tiefenbild	51
4.3.2	NFT / Packbild	51

4.3.3	Marker / Inside Out	52
4.3.4	Marker / Outside In	52
4.3.5	ART-SMARTTRACK	53
4.3.6	ART-TRACKPACK	54
4.3.7	Qualisys-Oqus	56
4.3.8	Axios3D-Cambar	57
4.3.9	Nexonar Ultraschall (US)	58
4.3.10	Nexonar US / IR	60
4.3.11	Nexonar US / Marker	61
4.3.12	Nexonar US / Inertialsensoren	62
4.3.13	Polhemus	62
4.4	Evaluierungsergebnisse	63
5	Ausgewählte Trackinglösungen	66
5.1	Natural Feature Tracking (NFT) mit Tiefenbild	66
5.2	Kooperation mit Nexonar	69
5.2.1	Trackingtechnologien Nexonar	69
5.2.2	Praktische Tests	70
5.2.3	Diskussion der Lösungsansätze	73
5.2.4	Fazit	75
6	Ablagekontrolle	77
6.1	Kinect Control	80
6.2	Packbild Control	80
6.3	Workflow - Programmablauf	83
6.3.1	Berechnung des Startpunkts	84
6.3.2	Clustering	84
6.3.3	Berechnung des 3D-Kartons	85
6.3.4	Überprüfung des Kartons	85
6.4	Detektionsalgorithmus	87
6.5	Messgenauigkeiten	89
6.5.1	Karton bei (0,0,0)	91
6.5.2	Karton bei (0,0,810)	92
7	Conclusio	94
	Literaturverzeichnis	96
A	Abarbeitung eines Packbildes	101

Abbildungsverzeichnis

2.1	Realität-Virtualität Kontinuum von Milgram [MTUK94]	7
3.1	Abweichung in x-y Ebene	12
3.2	Schematische Darstellung des Messfehlers in der x-y Ebene . .	13
3.3	Trackingvarianten nach Genauigkeit und Reichweite [Mau12] .	15
3.4	Funktionsweise CLIPS [TM11]	17
3.5	Kamera mit angebrachten Gyroskopen [Kle06]	18
3.6	Microsoft Kinect Sensor [Pro11]	21
3.7	Grundriss des FFZ mit zusätzlichem Rahmen	22
3.8	Aufriss des FFZ mit zusätzlichem Rahmen	22
3.9	Active Bat Transmitter[WJH97]	25
3.10	Cricket Unit [Mau09]	26
3.11	Nexonar Single Beacon Adapter und Sigle Beacons	27
3.12	Nexonar 3D Listener	27
3.13	Nexonar Triplet Beacon	28
3.14	Nexonar Quadlet Beacon	28
3.15	iGPS Transmitter und Sensor [Mau09]	32
4.1	Funktionsprinzip Inside-Out/Outside-In Tracking [WBV ⁺ 01] .	34
4.2	Übersicht Vorauswahl der Trackingmethoden	35
4.3	Flurförderfahrzeug mit Messbereich	50
4.4	2D Marker	52
4.5	ART SMARTTRACK Kamera	53
4.6	ART Marker auf Head Mounted Display	53
4.7	Visualisierung Messraum ART SMARTTRACK	54
4.8	ART TRACKPACK Kamera	55
4.9	Anordnung Kameras - ART TRACKPACK	55
4.10	Qualisys Oqus Kamera	56
4.11	Qualisys Marker	56
4.12	Axios3D Cambar	57
4.13	Axios3D Marker	57
4.14	Visualisierung Messraum Axios3D Cambar	58

4.15	Visualisierung Messraum Nexonar US	59
4.16	Visualisierung Messraum Nexonar US/IR Hybridlösung	60
5.1	Systemdesign NFT mit Tiefenbildkamera	68
5.2	Testaufbau bei Nexonar mit IR und US Tracking	71
5.3	Testaufbau Nexonar - Ablage einer Kiste über Kopf	72
6.1	Technischer Umfang Ablagekontrolle - NFT Tracking	78
6.2	Testaufbau der Ablagekontrolle	79
6.3	Screenshot von Kinect Control	81
6.4	Screenshot von Packbild Control	82
6.5	Init Pallet in Kinect Control	83
6.6	Kinect Control nach erfolgreicher Clusterung	85
6.7	Packbild Control nach erfolgreicher Detektion eines Kartons	86
6.8	Aufbau - Karton bei Koordinaten (0,0,0)	89
6.9	Aufbau - Karton bei Koordinaten (0,0,810)	90
6.10	Koordinatensystem der Palette	90
A.1	Ablage Box 1	101
A.2	Ablage Box 2	101
A.3	Ablage Box 3	102
A.4	Ablage Box 4	102
A.5	Ablage Box 5	102
A.6	Ablage Box 6	102
A.7	Ablage Box 7	102
A.8	Ablage Box 8	103
A.9	Ablage Box 9	103
A.10	Ablage Box 10	103
A.11	Ablage Box 11	103

Tabellenverzeichnis

3.1	Produkte optisches Tracking [Mau12]	19
3.2	Produkte IR-Tracking [Mau12]	22
3.3	Produkte Ultraschall Tracking [Mau12]	28
3.4	Produkte Magnetisches Tracking [Mau12]	30
4.1	AHP-Skala für Paarvergleichsurteile [ZP06]	44
4.2	Zufallskonsistenz R bei gegebener Matrixgröße n [MH12]	46
4.3	Kriterien- und Subkriteriengewichtungen	48
4.4	Lösungsvorschläge	50
4.5	Eckdaten ART SMARTTRACK	54
4.6	Eckdaten ART TRACKPACK	55
4.7	Eckdaten Qualisys Qqus	56
4.8	Eckdaten Axios3D Cambar	57
4.9	Eckdaten Nexonar US	59
4.10	Eckdaten Nexonar US/IR	61
4.11	Eckdaten Nexonar US/Marker	62
4.12	Ergebnis Analytic Hierarchy Process	63
4.13	Zusammenfassung Evaluierungsergebnisse	65
5.1	Vor- und Nachteile Lösungsvarianten Nexonar	76
6.1	Messabweichungen der Koordinaten - Karton bei (0,0,0)	91
6.2	Messabweichungen der Eckpunkte - Karton bei (0,0,0)	91
6.3	Messabweichungen der Koordinaten - Karton bei (0,0,810)	92
6.4	Messabweichungen der Eckpunkte - Karton bei (0,0,810)	92

Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytical Hierarchy Process
AR	Augmented Reality
CCD	Charge-coupled Device
DOF	Degree of Freedom
FFZ	Flurförderfahrzeug
HMD	Head-Mounted Display
IR	Infrarot
NFT	Natural Feature Tracking
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
US	Ultraschall
VR	Virtual Reality
WLAN	Wireless Local Area Network

Kapitel 1

Problemstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Trackingsysteme für die Positionsbestimmung eines Kommissionierers, der das KiSoft Vision Kommissioniersystem verwendet, gegenüber einer Palette zu evaluieren. Die relative Pose (Position und Orientierung) der Person soll für die Darstellung augmentierter Objekte auf der Palette verwendet werden. Im Speziellen soll die Ablageposition des zu kommissionierenden Gutes augmentiert werden. Zusätzlich ist die Ablage eines Kartons von einem Kontrollsystem zu überprüfen. Als Grundlage für die Evaluierung der einzelnen Trackinglösungen sollen zuerst die unterschiedlichen Trackingvarianten hinsichtlich ihrer technischen Aspekte betrachtet werden. Darauf basierend werden konkrete Szenarien – gemeinsam mit potentiellen Anbietern – erarbeitet. Ziel der Evaluierung ist es, die Auswahl der Trackinglösungen auf zwei bis drei ausgearbeitete Szenarien einzuschränken.

Die maximale Trackingdistanz von der Palette ist mit 3 Metern festgelegt. Zusätzlich soll bei einer Sichtdistanz von einem Meter (Kopf bis Palette) eine Messgenauigkeit von +/- 5 mm erreicht werden können. Diese Anforderung an die Messgenauigkeit dient vor allem als erster Anhaltspunkt für eine Vorselektion der unterschiedlichen Trackingtechnologien. Folgende Rahmenbedingungen sind gegeben: Im Lager sind sowohl Euro als auch Düsseldorfer Paletten in Verwendung. Diese werden bis zu einer Höhe von 2,2 m gepackt. Es werden elektrische Flurförderfahrzeuge für die Kommissionierung verwen-

det. Ein Flurförderfahrzeug kann bis zu zwei Paletten aufnehmen. (zwei Euro oder eine Euro und eine Düsseldorfer Palette). Das Tracking muss in Echtzeit durchgeführt werden. Die Bestimmung der Pose ist nur notwendig wenn der Kommissionierer auf die Palette blickt. Etwaige andere Paletten und Flurförderfahrzeuge dürfen das Tracking nicht negativ beeinflussen. An das Kontrollsystem, das für die Bestätigung der Ablage eines Kartons auf der Palette zuständig ist ergeben sich folgende Anforderungen: Das System soll in der Lage sein, Position und Dimensionen eines abgelegten Kartons zu erkennen. Diese Daten werden anschließend für die Verifikation der Ablage verwendet. Dabei soll der Arbeitsprozess des Kommissionierers nicht unterbrochen werden. Im Zuge dieser Masterarbeit soll ein kamerabasierter Prototyp einer derartigen Ablagekontrolle realisiert werden. Sowohl für die Auswahl des Trackingsystems als auch für die Realisierung des Kontrollsystems gilt, dass weder Arbeitsergonomie noch Sicherheit des Mitarbeiters negativ beeinflusst werden dürfen.

Kapitel 2

Pick by Vision

In diesem Kapitel werden die beiden Themenbereiche *Kommissionierung* und *Augmented Reality* beschrieben. Dabei wird keineswegs Anspruch auf Vollständigkeit gestellt. Weitere Informationen sind aus den angegebenen Literaturquellen zu entnehmen. Unter *Pick by Vision* versteht man eine Technologie zur Kommissioniererführung, bei der die Informationen dem Kommissionierer visuell übermittelt werden. In Kombination mit Augmented Reality (AR) kann der Kommissionierer einerseits durch das Lager navigiert werden und andererseits können ihm die zu kommissionierenden Artikel in Art und Menge angezeigt werden.

2.1 Kommissionierung

Eine Definition des Kommissioniervorgangs wird in der VDI Richtlinie 3590 Blatt 1 [Ver94] gegeben:

„Kommissionieren hat das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen (Artikel) auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen.“

Kommissionierung tritt in der logistischen Kette an unterschiedlichen Stellen auf. Einerseits im Bereich der Distribution, andererseits bei der Versorgung von Fertigung und Montage.

2.1.1 Der Aufbau eines Kommissioniersystems

In [Ver94] wird ein Kommissioniersystem in folgende drei Bereiche gegliedert:

- Materialfluss
- Informationsfluss
- Organisation

Das **Materialflusssystem** ist für den physischen Transport der Güter verantwortlich. Dessen Funktionen und Ausprägungen sind in [HSB11] angeführt.

Nach [HSB11] besitzt der **Informationsfluss** elementaren Einfluss auf die Funktionalität und Effizienz eines Kommissioniersystems. *„Nur bei einer fehlerfreien, vollständigen, rechtzeitigen und bedarfsgerechten Erfassung, Verarbeitung und Bereitstellung der Informationen kann ein Kommissioniersystem die geforderte Leistung erbringen.“* Eine wichtige Rolle im Informationssystem spielen Identifikationstechniken, die es ermöglichen Artikel rasch zu identifizieren und eine Bestandsfortschreibung durchzuführen.

Die **Organisationsform** des Kommissioniersystems ist nach [HSB11] *„die Wahl der Struktur und Steuerung der Abläufe innerhalb des Kommissioniersystems.“* Weitere Informationen bzgl. der Organisationsform eines Kommissioniersystems sind aus [HSB11] zu entnehmen.

2.1.2 Informationstechnische Kommissioniererführung

Unter *informationstechnischer Kommissioniererführung* versteht man die Weiterleitung der relevanten Kommissionierinformationen an den Kommissionierer. Diese beinhalten sowohl Art und Menge der Artikel, die entnommen werden sollen, sowie örtliche Information bzgl. Entnahme- und Bereitstellungsposition. [HSB11]. Je nach Kommissionieraufgabe kommen unterschiedliche Systeme zur Kommissioniererführung zum Einsatz. Die gängigsten Technologien befinden sich in folgender Auflistung. Nähere Informationen sind aus [HSB11] zu entnehmen.

- **Pickliste**
Hier werden die Informationen dem Kommissionierer auf einem Blatt Papier übermittelt.
- **Stationäre Terminals**
Ersatz der Picklisten durch Computer Terminals - Aufträge können zeitnah angepasst werden. Dieses System ist ortsfest.
- **Mobile Datenterminals**
Der Kommissionierer kann sich mit seinem Computer Terminal frei durch das Lager bewegen.
- **Pick-by-Light**
Der Lagerplatz von dem entnommen werden soll wird durch das Aufleuchten einer Lampe gekennzeichnet.
- **Put-to-Light**
Diese Systeme markieren den Abgabeort der Kommissioniereinheit durch Aufleuchten einer Lampe.
- **Pick-by-Voice**
Hierbei erhält der Mitarbeiter seine Anweisung akustisch über Kopfhörer.

2.1.3 Kennzahlen

Um Kommissioniersysteme bewerten und vergleichen zu können werden Kennzahlen verwendet. Diese sind in der VDI Richtlinie 4490 [Ver07] definiert und in folgende Gruppen unterteilt:

1. Mengen- und Strukturdaten

Zu erfüllender Aufgabenumfang, Anzahl und Kapazität der Aufgabenträger.

2. Leistungskennzahlen

Produktivität der Mitarbeiter und der technischen Betriebseinrichtungen.

3. Qualitätskennzahlen

Beurteilung des Grades der Zielerreichung.

4. Betriebswirtschaftliche Kennzahlen

Anfallende Kosten im Betrachtungszeitraum.

Eine vollständige Auflistung aller, je Gruppe definierten Kennzahlen ist in [Ver07] angeführt.

2.2 Augmented Reality

Der Begriff *Augmented Reality* steht in Zusammenhang mit dem Begriff *Virtual Reality*. Da für die Definition von AR häufig der Unterschied zwischen AR und Virtual Reality (VR) verwendet wird, ist an dieser Stelle eine Definition des Begriffs Virtual Reality (VR) angeführt.

2.2.1 Definition Virtual Reality

In [Gab] wird Virtual Reality als „*computergenerierte, dreidimensionale Welt, die versucht, der Realität möglichst nahe zu kommen*“, beschrieben. Als Beispiel für eine VR Anwendung wird in [Gab] die Vorführung von geplanten Gebäuden beim Architekten angeführt. Der Kunde kann das geplante Gebäude am Bildschirm, mit Hilfe spezieller Hardware, virtuell betreten und besichtigen.

2.2.2 Reality - Virtuality Continuum

In [MTUK94] werden die Begriffe VR und AR erstmals in Beziehung zueinander gesetzt. Dieser Zusammenhang wird als *Reality - Virtuality Continuum* bezeichnet und ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

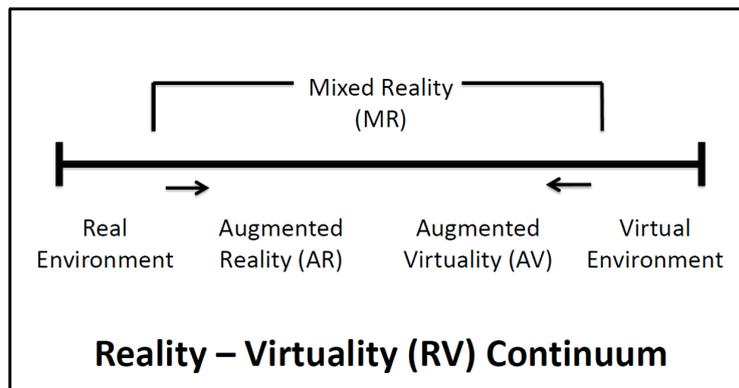


Abbildung 2.1: Realität-Virtualität Kontinuum von Milgram [MTUK94]

2.2.3 Definition Augmented Reality

Eine bekannte Definition von Augmented Reality (AR) ist in [Azu97] angeführt:

„Augmented Reality (AR) is a variation of Virtual Environments (VE), or Virtual Reality as it is more commonly called. VE technologies completely immerse a user inside a synthetic environment. While immersed, the user cannot see the real world around him. In contrast, AR allows the user to see the real world, with virtual objects superimposed upon or composited with the real world. Therefore, AR supplements reality, rather than completely replacing it. Ideally, it would appear to the user that the virtual and real objects coexisted in the same space [...].“

AR erlaubt dem Benutzer die reale Welt inklusive überlagerter virtueller Objekte zu betrachten. AR ist somit eine kontextabhängige Überlagerung der Realität mit digitalen Informationen. Im Gegensatz dazu taucht der Benutzer bei VR Anwendungen vollständig in eine künstliche Welt ein.

2.2.4 Die Struktur eines AR-Systems

Nach [Azu97] zeichnet sich ein AR-System durch folgende drei Merkmale aus:

1. Kombination von Realität und Virtualität
2. Interaktion in Echtzeit
3. Positionserfassung in 3D

In [Sch08] werden diesen Merkmalen technische Systeme zugeordnet:

Technisches System	Kombination Realität / Virtualität	Interaktion in Echtzeit	Positionserfassung in 3D
Trackingsystem		X	X
Szenengenerator	X	X	
Datenbanksystem	X		
Anzeigesystem	X		

Das **Trackingsystem** ist für die Erfassung der Positionen des Anwenders und der Objekte in der Arbeitsumgebung verantwortlich. Trackingsysteme lassen sich primär nach physikalischen Prinzipien einteilen (mechanisch, optisch, inertial, magnetisch, akustisch, elektromagnetisch). Eine ausführliche Beschreibung der unterschiedlichen Trackingtechnologien folgt in Kapitel 3.2. Der **Szenengenerator** ist ein Computer, der unter Verwendung der Trackingdaten die Informationen für die Darstellung aufbereitet. Auf Informationen, die angezeigt werden sollen, kann mithilfe des **Datenbanksystems** zugegriffen werden. Die vom Szenengenerator berechnete Darstellung wird dem Nutzer schließlich am Anzeigesystem dargestellt. Als **Anzeigesysteme** kann neben einem Head-Mounted Display (HMD) auch ein handgeführtes Gerät (z.B.: Smartphone oder Tablet), ein projizierendes Display (direkte Projektion der Information auf das zu erweiternde Objekt) oder ein fest montiertes Display verwendet werden.

2.2.5 Anwendungsgebiete von AR

AR Anwendungen haben bereits in vielen Bereichen Einzug gehalten. Folgende Auflistung zeigt unterschiedliche Einsatzgebiete, in denen bereits AR-Systeme eingesetzt werden.

- Automobil und Flugzeugindustrie [RBW05] (Service, Instandhaltung, Design, Entwicklung, Training)
- Logistikanwendungen [RW07] (Layout Planung, Kommissionierung)
- Medizin [Sut06] (Chirurgie)
- Sport [ABB⁺01] (Fernsehübertragungen)
- Mitarbeiterschulung [Wes12] (Montage und Instandhaltung)
- Spielindustrie [Che10]
- Erziehung [Kau04]
- Werbung [Kra12]

Kapitel 3

Trackingtechnologien und Grundlagen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Trackingvarianten vorgestellt sowie hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile betrachtet. Zusätzlich werden für jede Variante prinzipielle Hardwarevoraussetzungen zusammengefasst. Dieses Kapitel (mit Ausnahme von Abschnitt 3.1) ist, wenn nicht anders angegeben, sinngemäß aus [Mau12] entnommen.

3.1 Trackingaufgabe

Wie in Kapitel 1 beschrieben, soll die relative Pose eines Kommissionierers gegenüber einer Palette bestimmt werden. Der Begriff *Pose* ist in [Ver88] definiert. Er beinhaltet Position und Orientierung eines Körpers im kartesischen Raum in sechs Freiheitsgraden (Degree of Freedom (DOF)).

Zusätzlich ist bekannt, dass die Palette stets von einem Horizontalkommissionierer¹ ohne Hubvorrichtung transportiert wird, und somit das FFZ als Referenzobjekt herangezogen werden kann. Prinzipiell lässt sich diese Aufgabe auf zwei Arten lösen:

¹in weiterer Folge allgemein als Flurförderfahrzeug (FFZ) bezeichnet

- Absolutes Tracking der Person und des Flurförderfahrzeuges.
- Relatives Tracking der Person im Bezug auf das Flurförderfahrzeug.

Für erstere Variante muss eine Möglichkeit geschaffen werden, mehrere mobile Ziele, in diesem Fall Mensch und FFZ, gleichzeitig im gesamten Lagerbereich zu Tracken. Dazu ist es nötig, die gesamte Halle mit zusätzlicher Tracking Infrastruktur auszustatten. Beim zweiten Ansatz wird das FFZ als Referenzpunkt verwendet. Das heißt es wäre bloß nötig die Pose der Person relativ zum FFZ zu ermitteln, ohne die Position des Flurförderfahrzeuges selbst zu kennen.

3.1.1 Anforderungen an die Trackinggenauigkeit

Die in weiterer Folge vorgestellten Trackingtechnologien, unterscheiden sich prinzipiell dadurch, dass manche von ihnen direkt die Pose der Person ermitteln können. Andere sind bloß in der Lage, die Position ohne Orientierung zu bestimmen. Dies ist prinzipiell dann der Fall, wenn zur Positionierung nur ein Sensor verwendet wird. Um dennoch die Pose bestimmen zu können, müssen mehre Sensoren verwendet werden. Es könnten beispielsweise drei Sensoren in der Form eines gleichseitigen Dreiecks am Kopf der Person angebracht werden. Die Kantenlänge dieses gleichseitigen Dreiecks sei 20 cm. Diese drei Sensoren werden anschließend separat lokalisiert. Sind die Position der drei Sensoren bekannt, so kann das vorgegebene Dreieck dazu gefittet werden. Auf die Art und Weise, wie dieses Fitting funktionieren soll, wird hier nicht näher eingegangen. Anschließend wird der Mittelpunkt M des Dreiecks berechnet. Um die Orientierung zu bestimmen, wird der Vektor \vec{o} ermittelt, der seinen Ursprung in M hat und normal auf die Kante \overline{AB} steht. Dies ist in Abbildung 3.2 skizziert.

Basierend auf diesem prinzipiellen Aufbau soll nun ermittelt werden, welcher maximale Fehler bei der Positionierung der einzelnen Sensoren zulässig ist, um insgesamt eine Trackinggenauigkeit von 1 cm bei einer Distanz von 1,5 m zwischen Person und Palette gewährleisten zu können. Die Positionierungsfehler der einzelnen Sensoren können zu einer „Verdrehung“ des Dreiecks und

somit zu einer „falschen Blickrichtung“ \vec{o}' der Person führen. Diese Situation ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

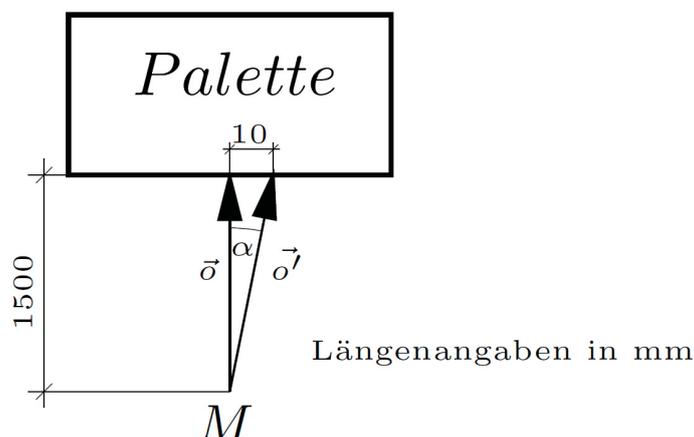


Abbildung 3.1: Abweichung in x-y Ebene

Als erste Annäherung, bzw. um die Größenordnung des maximal zulässigen Positionierungsfehler der einzelnen Sensoren zu erhalten, wird die Abweichung im 2-dimensionalen Fall (in der x-y Ebene) berechnet. Die exakte Ausrichtung der Person gegenüber der Palette sei durch \vec{o} gegeben. \vec{o}' sei die Richtung, welche aus den Messfehlern bei der Positionierung der einzelnen Sensoren resultiert. Der maximale Winkel zwischen \vec{o} und \vec{o}' sei α_{max} . Es gilt: $\alpha_{max} = \arctan \frac{1}{150} = 0.382^\circ$ (siehe Abbildung 3.1). Anhand von α_{max} kann der maximale Positionierungsfehler e_{max} für die einzelnen Sensoren ermittelt werden. Dazu muss das, durch die Verschiebung der Eckpunkte entstandene gleichschenkelige Dreieck MCC' betrachtet werden. Die Kantenlänge x der Kanten MC und MC' errechnet sich wie folgt: $x = \frac{s}{\sqrt{3}}$, wobei s die Seitenlänge des gleichseitigen Dreiecks aus Abbildung 3.2 ist. Bei einer Kantenlänge von 20 cm ist x 11,55 cm lang. Der maximale Positionierungsfehler e_{max} kann anschließend nach Gleichung 3.1 ermittelt werden.

$$e_{max} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{max}}{2}\right) \cdot x \quad (3.1)$$

Daraus folgt: $e_{max} = 0,77 \text{ mm}$

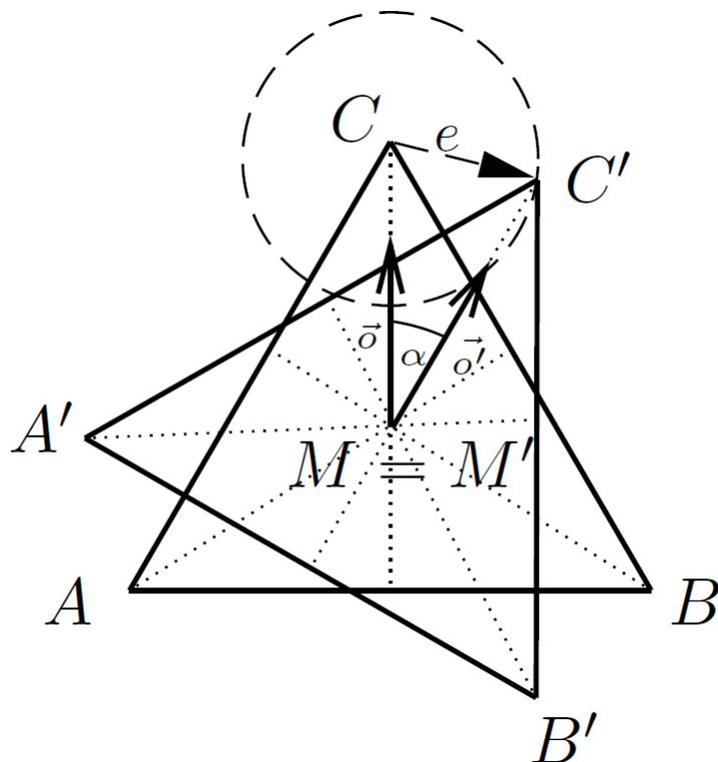


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Messfehlers in der x-y Ebene

Aus der Berechnung resultiert eine ziemlich geringe Toleranz für die Messgenauigkeit der einzelnen Sensoren. Anhand eines Gegenbeispiels soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen eine höhere Fehlertoleranz mit sich bringen würde. Angenommen die Toleranz e der einzelnen Sensoren beträgt 5 mm. Dies hätte zur Folge, dass der Winkel α aus Abbildung 3.2 $2,48^\circ$ annimmt. Somit würde die maximale Abweichung beim Blick auf die Palette (siehe Abbildung 3.1) 6,50 cm betragen.

3.2 Trackingtechnologien

In [Mau12] befindet sich eine Auflistung jener Trackingtechnologien, die für den *Indoor*-Anwendungsbereich in Frage kommen. Diese werden in 13 unterschiedliche Technologien gegliedert, welche in folgender Auflistung angeführt sind:

- Optische Systeme
- Infrarot
- Tast und polare System
- Schall
- Wireless Local Area Network (WLAN)
- Radio Frequency Identification (RFID)
- Ultra-Wideband
- Hoch sensibles 'Global Navigation Satellite System'
- Pseudoliten
- sonstige Funkfrequenzen
- Inertiale Navigation
- Magnetische Systeme
- Infrastruktur Systeme.

Für die aufgelisteten Trackingvarianten sind sowohl Reichweite (*Coverage*) als auch Trackinggenauigkeit (*Accuracy*) in Abbildung 3.3 angegeben. Da laut Aufgabenstellung ein Trackingverfahren mit einer Genauigkeit von ± 5 mm gefordert ist, wird in weiterer Folge nur noch auf jene Varianten eingegangen, die diese Vorgabe prinzipiell erfüllen können.

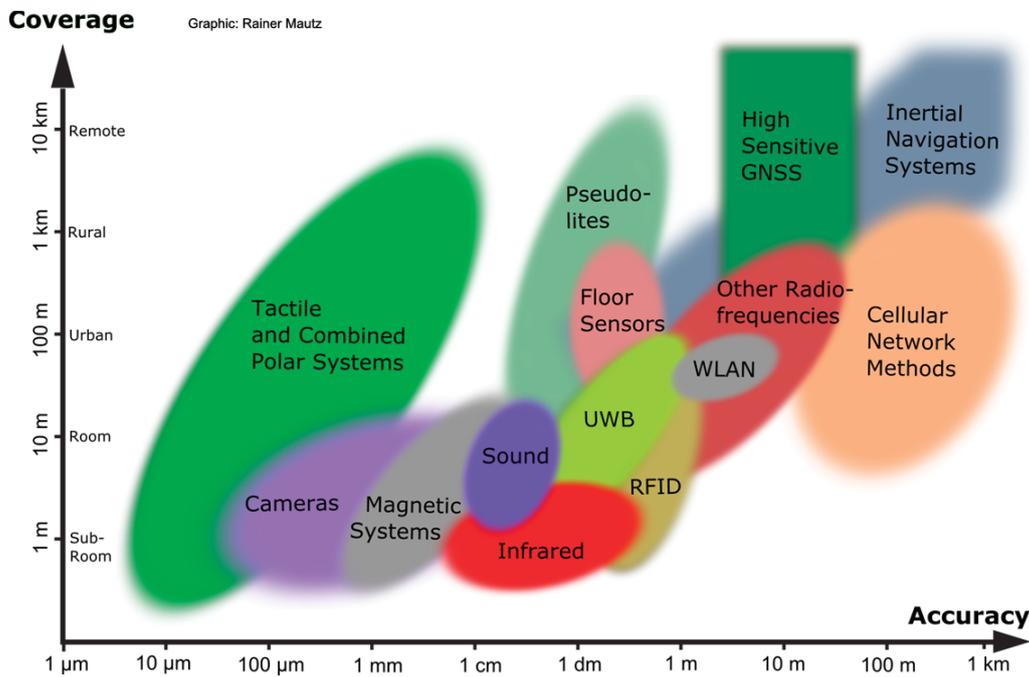


Abbildung 3.3: Trackingvarianten nach Genauigkeit und Reichweite [Mau12]

3.3 Optische Systeme

Prinzipiell können optische Trackingsysteme in zwei Kategorien unterteilt werden. Es kann einerseits die Position einer mobilen Kamera ermittelt werden, oder andererseits ein bewegliches Objekt mithilfe von statischen Kameras lokalisiert werden.

Die Messgenauigkeit der optischen Trackingvarianten variiert zwischen m und μm Bereich. Aus diesem Grund werden diese Trackingverfahren in einem breitem Anwendungsspektrum eingesetzt.

3.3.1 Referenz auf 3D Modelle

Die Funktionsweise dieser Trackingvarianten basiert auf der Erkennung von Objekten in Bildern, welche zu einer hinterlegten Datenbank des Gebäudes referenziert werden. Diese Datenbank enthält die Positionsinformationen über die zu erkennenden Einrichtungsgegenstände. Der Vorteil dieser Variante liegt darin, dass keine zusätzliche Infrastruktur wie z.B.: Marker oder

Sensoren installiert werden müssen. Des weiteren können große Bereiche ohne signifikanten Anstieg der Kosten abgedeckt werden. Drei Anwendungsbeispiele, die auf diesem Messprinzip basieren sind in [Mau12] angeführt.

3.3.2 Referenz auf Bilder

Der sogenannte „view-based“-Ansatz basiert darauf, dass im Zuge der Initialisierungsphase Bildsequenzen entlang von bestimmten Routen im Gebäude aufgenommen werden. Beim Tracking wird das aktuelle Bild der mobilen Kamera mit den bereits aufgenommenen Bildern verglichen. Anwendungen sind wiederum in [Mau12] angeführt.

3.3.3 Referenz auf Marker

Durch den Einsatz von eindeutigen Markern kann die Robustheit des Trackings gesteigert werden. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn die Beleuchtung der Umgebung stark schwankt bzw. die zu überwachenden Bereiche große Ähnlichkeiten aufweisen, wie es zum Beispiel in einem Lager der Fall ist. Marker liefern folgende drei Vorteile:

- Vereinfachung der automatischen Erkennung von definierten Punkten.
- Einführung einer Skala.
- Unterscheidung und Identifizierung von Zielen mit gleichem Aussehen durch Einsatz von eindeutigen Codes für jeden Marker.

3.3.4 Referenz auf projizierte Ziele

Durch die Projektion von Mustern auf Objekte in der Umgebung kann vermieden werden, dass physische Marker an den Objekten angebracht werden müssen. Das Problem besteht jedoch darin, dass sowohl die Lichtquelle, von welcher das Identifikationsmuster ausgesendet wird, als auch die Kamera direkten Sichtkontakt zum beleuchteten Objekt benötigen. Eine Methode, die

auf diesem Prinzip beruht ist *CLIPS* (Camera and Laser based Indoor Positioning System), welches an der ETH Zürich entwickelt wurde [TM10]. Die Funktionsweise von CLIPS ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

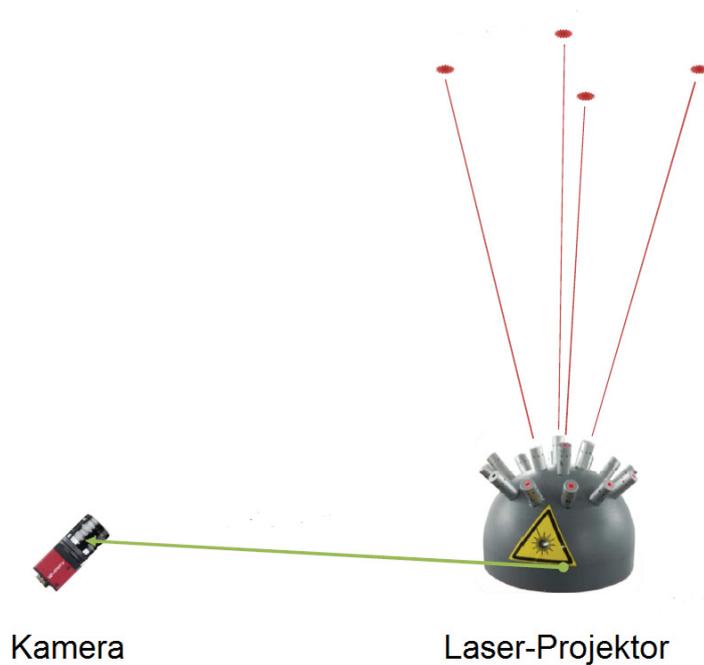


Abbildung 3.4: Funktionsweise CLIPS [TM11]

3.3.5 System ohne Referenz

Das Ziel dieser Trackingsysteme ist es, Positionsveränderungen von Objekten zu erkennen und diese zu messen. Daher werden keine externen Referenzen benötigt. Üblicherweise werden mobile Objekte mithilfe von statischen Kameras „verfolgt“.

3.3.6 Referenz von anderen Sensoren

Häufig werden optische Trackingsysteme mit zusätzlichen Sensoren kombiniert, um die Messgenauigkeit und Stabilität des Systems zu verbessern.

Kombination mit Inertialsensoren

Ein derartiger Ansatz wird von [Kle06] vorgestellt, welcher ein markerloses Trackingsystem für Augmented Reality Anwendungen entwickelt hat. Prinzipiell besteht dieses System aus einer Kamera, die gemeinsam mit drei Gyroskopen am Kopf der Person montiert ist. Die Positionierung basiert auf dem Prinzip des *NFT*. Hierbei werden Kanten von bekannten drei-dimensionalen Objekten, von welchen ein CAD-Modell vorhanden ist, im Bild „gesucht“. Um diese Suche zu beschleunigen, wird eine *a priori* Annahme hinsichtlich der Position der Kanten im Bild getroffen. Zu diesem Zweck werden die drei Gyroskope verwendet. Gyroskope messen die Winkelgeschwindigkeit und die Pose wird anschließend mittels Integration dieser Messungen ermittelt. Da jedoch jede Messung mit Fehlern behaftet ist, ergibt sich im Laufe der Zeit ein immer größer werdender Fehler. Prinzipiell lässt sich festhalten, dass Gyroskope zwar bei raschen Drehungen zuverlässige Messungen liefern, bei langsamen Bewegungen oder Stillstand jedoch unzuverlässig sind. Des Weiteren weisen Gyroskope eine hohe Messrate auf (in diesem Fall 171 Hz). Für das optische Trackingsystem, basierend auf NFT gilt genau das Gegenteil. Daher bietet sich eine Kombination dieser beiden Technologien an.



Abbildung 3.5: Kamera mit angebrachten Gyroskopen [Kle06]

Die Messungen der Gyroskope werden nun dazu verwendet, um die Bewegungen der Person zwischen den einzelnen Bildaufnahmen, welche mit einer

Rate von 50 Hz gemacht werden, zu berücksichtigen. Diese Informationen werden verwendet, um eine genaue *a priori* Schätzung bzgl. der zu erkennen- den Kantenpositionen im Bild zu erhalten. Die Kamera, gemeinsam mit den daran angebrachten Gyroskopen, ist in Abbildung 3.5 zu sehen.

3.3.7 Anwendbarkeit und verfügbare Produkte

Je nach verwendetem technologischem Prinzip ergeben sich unterschiedliche Anforderungen. Für Systeme welche die Position mithilfe von Projektion bestimmen wäre es notwendig den Projektor auf dem Stapler anzubringen. Die Kamera ist in diesem Fall an der Person selbst angebracht. Dies hätte den Vorteil, dass nicht die gesamte Lagerhalle mit zusätzlicher Infrastruktur ausgestattet werden muss. Jedoch ist zu Prüfen, ob ein derartiger Aufbau technisch realisierbar ist.

In [MWSB09] wird ein kostengünstiges Trackingsystem vorgestellt, wobei das Tracking von Kameras auf Mobiltelefonen durchgeführt wird. Dazu werden 2D Barcodes in der Arbeitsumgebung angebracht. Dieses System kann die Position der Kamera auf ein paar *cm* genau erfassen. Bei zunehmendem Abstand zwischen Kamera und Marker nimmt die Genauigkeit ab.

Beim NFT erfolgt die Positionsbestimmung ohne virtuelle/physische Marker. Das in [Kle06] vorgestellte Verfahren basiert auf dieser Technologie und verwendet zusätzlich noch Gyroskope. Hierbei ist die Kamera am Kopf des Kommissionierers angebracht. Eine Möglichkeit würde auch darin bestehen, eine Kamera am Stapler anzubringen, um mit dieser die Position der Person festzustellen. Auch ein Aufbau, bei dem sowohl eine Kamera am Stapler und eine an der Person angebracht sind wäre denkbar.

Name	Referenz	Genauigkeit	Rate	Abdeckung
Mulloni	Marker	m - dm	15 Hz	skalierbar
naviSCAN3D	Projektion	50 μm	1 Hz	1,5 - 10 m
CLIPS (Entwicklung)	Projektion	0,5 mm	30 Hz	36 m^2

Tabelle 3.1: Produkte optisches Tracking [Mau12]

3.4 Infrarot

IR Lichtwellen können vom menschlichem Auge nicht wahrgenommen werden, da ihre Wellenlänge länger als jene des sichtbaren Lichts ist. Daher können Infrarot Strahlen zur Lokalisierung verwendet werden, ohne die Menschen in der Umgebung abzulenken bzw. zu irritieren. Für den Aufnahme von IR-Licht wird eine Kamera benötigt. Daher kann diese Technologie auch als optisches System betrachtet werden. Die Systeme können dahingehend unterschieden werden, ob künstliches IR Licht verwendet wird oder das System im Bereich der natürlichen IR Strahlung arbeitet.

3.4.1 Natürliche IR Strahlung

Passive Infrarot Systeme sind in der Lage die natürliche Wärmestrahlung, deren Wellenlänge im Bereich von $8 \mu\text{m}$ und $15 \mu\text{m}$ liegt, zu erfassen. Daher ist es nicht notwendig eine aktive Infrarot-Beleuchtung anzubringen. Typische Anwendungen dieser Technologie sind Wärmebildkameras. Für den hier behandelten Anwendungsfall ist diese Technologie jedoch nicht relevant, da es nicht möglich ist, mit einer Wärmebildkamera die Kopf-Pose einer Person zu ermitteln.

3.4.2 Künstliches IR Licht

Diese Systeme basieren auf aktiven Infrarot Lichtquellen sowie Infrarot sensiblen Charge-coupled Device (CCD)-Kameras. Einerseits können die Infrarotstrahlen von fix montierten, aktiven Infrarot LEDs ausgesendet werden. Andererseits kommen reflektierende Targets zum Einsatz. Mit Infrarot Kamera Systemen können Trackinggenauigkeiten im sub-mm Bereich erzielt werden. Jene Systeme, bei denen das IR Licht von aktiven Markern (LEDs) ausgestrahlt wird, werden im weiteren Verlauf **aktive** IR Tracking Systeme genannt. Um beispielsweise das Tracking innerhalb eines Raumes mit einem aktiven System zu realisieren, müssen IR-Empfänger (Kameras) so montiert werden, dass der gesamte Bereich abgedeckt ist. Die Person bewegt sich mit einem aktiven Marker durch den Raum und kann somit getrackt werden.

Systeme bei denen reflektierende Marker zum Einsatz kommen, werden als **passive** Systeme bezeichnet. Dabei wird zusätzlich zur IR Kamera noch ein IR Projektor benötigt, der den Messbereich ausleuchtet. Beiden Systemen, sowohl den aktiven als auch den passiven liegt der selbe Gedanke zu Grunde. Das Tracking Target (Marker) ist eine bekannte Anordnung von mehreren aktiven LEDs oder reflektierenden Markern. Werden diese von der Kamera aufgenommen, so kann die Pose des gesamten Markers, und so mit der Person, berechnet werden.

Microsoft Kinect

Der Microsoft Kinect Sensor ist mit einer RGB-Videokamera sowie einem Infrarot-Projektor und Empfänger ausgestattet. Er könnte somit auch in die Kategorie der optischen Trackingtechnologien eingeordnet werden. Das Infrarot System ist in der Lage Tiefendaten der aufgenommenen Szene zu ermitteln. Die Daten aus RGB- und Infrarotkamera werden miteinander kombiniert, um die Bewegungen einer Person zu erkennen. Reflektierende Marker kommen hier nicht zum Einsatz. Vergleiche dazu [Sch12].

Der Microsoft Kinect Sensor ist prinzipiell darauf ausgelegt, den menschlichen Körper sowie dessen Bewegungen und Gesten zu erkennen. Jedoch kann das System auch für individuelle Anwendungen, wie zum Beispiel Kantenerkennung, eingesetzt werden da das *Kinect for Windows SDK* von Microsoft frei zur Verfügung gestellt wird. Der Kinect Sensor ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

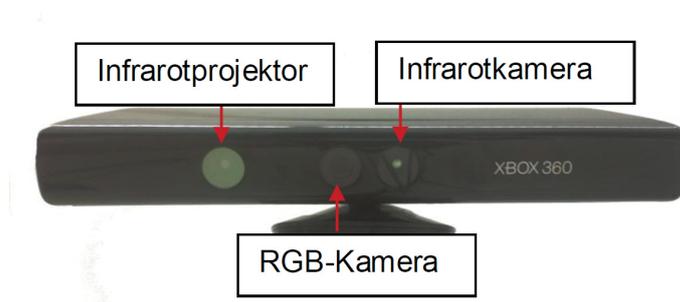


Abbildung 3.6: Microsoft Kinect Sensor [Pro11]

3.4.3 Anwendbarkeit und verfügbare Produkte

Um nicht die gesamte Lagerhalle mit Trackinginfrastruktur ausstatten zu müssen, wäre es von Vorteil eine Möglichkeit zu finden die benötigten Komponenten (Kameras, Marker) direkt am FFZ anbringen zu können. Dies könnte durch Montage eines Rahmens am FFZ erreicht werden, welcher den Bereich der Gabeln überdeckt. Dies ist in Abbildungen 3.7 und 3.8 schematisch dargestellt.

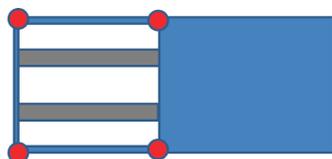


Abbildung 3.7: Grundriss des FFZ mit zusätzlichem Rahmen

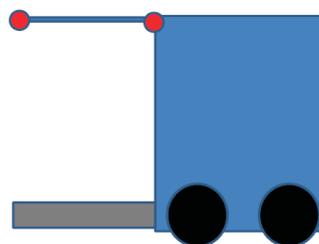


Abbildung 3.8: Aufriss des FFZ mit zusätzlichem Rahmen

An diesem Rahmen können nun die Kameras bzw. Marker montiert werden. Diese sind in den Abbildungen 3.7 und 3.8 als rote Kreise schematisch dargestellt. Somit ist es möglich, die Position der Person gegenüber dem FFZ zu ermitteln. Dieser Aufbau kann ebenso für Ultraschall Trackingsysteme, magnetische Trackingmethoden sowie für das kombinierte polare System iGPS verwendet werden.

Name	Jahr	Genauigkeit	Rate	Abdeckung	Technologie
Microsoft Kinect	2011	1 cm	30 Hz	3,5 m	IR Kamera
Hagisonic	2008	cm - dm	20 Hz	anpassbar	IR Kamera
Evolution Robitics	2010	cm - dm	10 Hz	36 m ²	IR Kamera

Tabelle 3.2: Produkte IR-Tracking [Mau12]

3.5 Ultraschall

Die relative Distanz zwischen einem Ultraschall Emitter und einem Ultraschall Empfänger kann mithilfe der Time of Arrival Methode ermittelt werden. Durch die indirekte Proportionalität zwischen quadratischem Abstand zur Schallquelle und Signalstärke können mit Ultraschall maximale Reichweiten von ca. 10 Metern realisiert werden. Im Allgemeinen werden Ultraschall Empfänger *Listener* und Ultraschall Emitter *Beacons* genannt.

Die Lokalisierung kann nun auf zwei Arten erfolgen. Am zu lokalisierendem Objekt befindet sich ein Beacon, welcher Ultraschallsignale aussendet. Diese werden von fix montierten Listenern empfangen, welche die Position des Beacons mittels Multilateration bestimmen. Dieses Prinzip kann auch umgekehrt verwendet werden. Das heißt fix montierte Beacons senden Signale aus, welche von einem mobilen Listener empfangen werden. Die statisch montierten Beacons bzw. Listener werden in weiterer Folge als *statische Knoten* bezeichnet. Analog wird der mobile Beacon/Listener *mobiler Knoten* genannt.

Um das Problem der zeitlichen Synchronisation zwischen statischen Beacons / Listener und mobilem Listener / Beacon zu lösen, sendet jeder Beacon zusätzlich zum Ultraschall Signal noch ein Radio Frequency (RF) Signal aus. Anhand dieser beiden Signale kann mithilfe der Time Difference of Arrival Methode eine rasche Lokalisierung vorgenommen werden. Der Radius r zwischen Beacon und Listener kann somit anhand der zeitlichen Differenz Δt zwischen Ankunft des RF und des Ultraschall Signals ermittelt werden.

$$\Delta t = \frac{r}{v_{US}} - \frac{r}{v_{RF}} \quad (3.2)$$

Hierbei sind $v_{US} \approx 344 \text{ m/s}$ die Schallgeschwindigkeit in Luft und $v_{RF} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit. Den größten Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit v_{US} stellt die Umgebungstemperatur T [$^{\circ}\text{C}$] dar. Der Zusammenhang ist in Gleichung 3.3 gegeben.

$$v_{US} = (331.3 + 0.606 \cdot T) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.3)$$

Ultraschall basierte Trackingmethoden werden meist für Indoor Tracking von Personen und mobilen Geräten verwendet. Einerseits sind die Temperaturgradienten im Freien größer. Andererseits führt Wind zu einem signifikant schlechterem Messergebnis. Des weiteren macht die relativ geringe Reichweite von ca. 10 m die Methode für den Außeneinsatz unpraktikabel. Natürlich kann die Reichweite durch Anbringen von zusätzlichen Beacons/Listener erweitert werden, jedoch ist dies im Freien oft nicht möglich, da einfach die Möglichkeiten für deren Montage fehlen.

3.5.1 Aktive Ultraschall Systeme

Bei *Active Device Systemen* senden Mobile Beacons Ultraschall Signale aus, welche von statischen Listnern empfangen werden. Befinden sich mehrere mobile Knoten im System, so muss das Aussenden der Ultraschall Signale zwischen den einzelnen Beacons zeitlich abgestimmt sein, damit es zu keinen Überlagerungen der Schallwellen kommt. Ein derartiges *Sende-Schema* für die Beacons wirkt sich negativ auf die Trackingrate aus.

Active Bat

Dieses Trackingsystem wurde 1997 in [WJH97] vorgestellt und gilt als Pionierarbeit auf dem Gebiet der Ultraschall Trackingsysteme. Das System basiert auf mobilen Beacons, welche an der Person angebracht sind. An der Decke des Gebäudes sind Ultraschall Empfänger angebracht. Die Position eines jeden Beacons wird mittels der Time of Flight-Multilateration ermittelt. Zusätzlich zur Position des Users wird auch dessen Orientierung ermittelt. Dies ist möglich, weil drei Beacons am User angebracht sind. Durch Bestimmung der Position der einzelnen Beacons kann die Orientierung des Users ermittelt werden. Die Trackinggenauigkeit beträgt laut [WJH97] 3 cm. Ein mobiler Transmitter, der bei Active Bat verwendet wird, ist in Abbildung 3.9 abgebildet.



Abbildung 3.9: Active Bat Transmitter[WJH97]

3.5.2 Passive Ultraschall Systeme

Bei *Passive Device Systemen* senden fix installierte Beacons Ultraschall Signale aus, welche von mobilen, passiven Receivern empfangen werden. Dieses System hat den Vorteil, dass die Positionsermittlung alleine auf den passiven, mobilen Empfängern durchgeführt wird. Daher kann die Anzahl der Benutzer (Empfänger) ohne dem Risiko der Signalüberlagerung, wie sie bei *Active Device Systemen* gegeben ist, erhöht werden.

Cricket

Dieses System wird in [Pri05] vorgestellt und gilt als Pionierarbeit auf dem Gebiet der *passiven Ultraschall Systeme*. Es ist folgenderweise aufgebaut: Beacons sind fix an der Decke des Raumes angebracht. Diese senden periodisch Ultraschall und RF Signale aus. Die mobilen Listener empfangen diese Signale und ermitteln somit die Distanz zu den Beacons in ihrer Nähe. Aus dieser Information wird anschließend die Position des Listeners ermittelt. Laut [Pri05] weist *Cricket* eine Genauigkeit von 10 cm bei der Positionsbestimmung sowie eine Orientierungsgenauigkeit von 3 Grad auf. In Abbildung

3.10 ist eine Cricket-Unit abgebildet.



Abbildung 3.10: Cricket Unit [Mau09]

3.5.3 Anwendbarkeit und verfügbare Produkte

Prinzipiell basieren sowohl die *Active Device Systeme* als auch die *Passive Device Systeme* auf fix montierten Knoten, welche an der Halleninfrastruktur (meist Decke) angebracht sind. Das heißt, die relative Position der Person zum FFZ kann anhand der absoluten Positionen der beiden Objekte ermittelt werden. Hierfür wäre es jedoch notwendig, die gesamte Lagerhalle mit Ultraschall Beacons bzw. Listnern auszustatten. Um diesem Problem zu entgehen, wäre zu prüfen, ob die stationären Knoten nicht an der Halleninfrastruktur sondern am Stapler selbst angebracht werden können, um anschließend die relative Pose der Person zu ermitteln. Hierbei wäre es wieder denkbar, einen Rahmen am FFZ anzubringen. Vergleiche dazu Abschnitt 3.4.3.

Nexonar-Produktreihe

Die Produktpalette *Nexonar* der Firma soft2tec (in weiterer Folge wird Nexonar als Synonym für soft2tec verwendet) umfasst Produkte für die Positionierung sowie die Bestimmung der Pose. Diese Systeme basieren auf aktiven Beacons, die an der Person angebracht sind, sowie fix montierten Ultraschall

Empfängern (*3D Listener*). Die Abmessungen dieses Listeners (siehe Abbildung 3.12 betragen 240 x 255 x 50 mm. Die Empfänger könnten, so wie in den Abbildungen 3.7 und 3.8 dargestellt, am FFZ angebracht werden. Die Beacons sind einzeln erhältlich oder auch als drei- und vierfach Beacons (*Triplet Beacon* und *Quadlet Beacon*). Deren Abmessungen betragen 110 x 150 (160) x 20 mm (siehe Abbildungen 3.13 und 3.14). Unter Einsatz der einfachen Beacons müsste die Berechnung der Pose selbst durchgeführt werden. Zusätzlich ist bei der Verwendung der Single Beacons ein Adapter notwendig, der die einzelnen Beacons koordiniert. Dieser Adapter, sowie die einzelnen Beacons sind in Abbildung 3.11 dargestellt (vgl. dazu Abschnitt 3.1.1). Laut Hersteller können einzelne Beacons mit einer Genauigkeit von $\approx 0,2$ mm lokalisiert werden. Die kombinierten Beacons erzielen eine Genauigkeit von $\approx 0,1$ mm. Die Messrate der Beacons liegt bei 50 Hz und deren Sendereichweite beträgt 1,5 m.



Abbildung 3.11: Nexonar Single Beacon Adapter und Single Beacons¹



Abbildung 3.12: Nexonar 3D Listener¹

¹Bildquelle: <http://www.nexonar.com/de>

Abbildung 3.13: Nexonar Triplet Beacon¹Abbildung 3.14: Nexonar Quadlet Beacon¹

Name	Jahr	Genauigkeit	Rate	Technologie
Nexonar	2013	0,1 mm	50 Hz	US aktiv
Acite Bat	1997	3 cm	5 Hz	US aktiv
Cricket	2005	1 - 2 cm	1 Hz	US passiv
Hexamite	2011	0,9 cm	30 Hz	US aktiv

Tabelle 3.3: Produkte Ultraschall Tracking [Mau12]

3.6 Magnetische Systeme

Diese Positionierungssysteme bedienen sich magnetischer und elektromagnetischer Felder. Magnetische Felder werden durch Permanentmagnete oder von stromdurchflossenen Spulen, entweder mit Wechselspannung oder pulsierender Gleichspannung, erzeugt.

3.6.1 Durch Gleichstrom erzeugte Magnetfelder

Mit Hilfe einer Spule, welche von Gleichstrom durchflossen wird, kann ein beinahe statisches magnetisches Feld erzeugt werden. Die Flussdichte \mathbf{B} des magnetischen Feldes kann anhand Gleichung 3.4 für einen beliebigen Punkt \mathbf{P} berechnet werden.

¹Bildquelle: <http://www.nexonar.com/de>

$$B(\phi, r) = \frac{\mu_0 u I F}{4\pi r^4} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \phi} \quad (3.4)$$

Hierbei ist μ_0 die Permeabilität im Vakuum, u die Anzahl der Spulenwindungen, I der elektrische Strom, F die Fläche der Spule, ϕ der Höhenwinkel eines Punktes \mathbf{P} im Bezug auf die Spule und r der Abstand zwischen \mathbf{P} und der Spule. Aufgrund der Rotationssymmetrie des magnetischen Feldes spielt der horizontale Winkel zwischen \mathbf{P} und der Spule keine Rolle in der Berechnung. Mithilfe von Gleichung 3.4 kann der Abstand sowie der Höhenwinkel zwischen einem Sensor am Ort \mathbf{P} relativ zu einer Spule ermittelt werden. Um eine 3D Position des Sensors zu ermitteln, müssen mehrere Spulen an bekannten Positionen verwendet werden. Dieser Ansatz hat folgende Vorteile:

- Verwendung in Non Line of Sight-Umgebung.
- Kein Einfluss auf das magnetische Feld durch Reflexion (Multipath-Problem).
- Bewegungstracking mit unlimitierter Anzahl an Sensoren und hoher Messerate möglich.

3.6.2 Durch Wechselstrom erzeugte Magnetfelder

Magnetfelder, die durch Wechselspannung hervorgerufen werden, sind bezüglich des Erdmagnetfeldes sowie künstlicher Magnetfelder, die von elektrischen Geräten erzeugt werden weniger empfindlich. Das elektromagnetische Trackingsystem LIBERTY von der Firma Polhemus verwendet ein solches Wechselstrom-Magnetfeld in Kombination mit bis zu 16 Sensoren zur Messung der Position sowie der Orientierung eines Zielobjekts. Die dabei erreichte Genauigkeit liegt im sub-mm Bereich und die Messfrequenz beträgt 240 Hz. Der Einsatzbereich liegt bei 1.5 bis 4.6 Metern.

3.6.3 Permanentmagnete

Systeme mit Permanentmagneten können prinzipiell auf zwei Arten aufgebaut sein. Ein mobiler Permanentmagnet wird mithilfe von statischen ma-

netischen Sensoren lokalisiert. Ebenso können die Permanentmagnete fix montiert sein und ein mobiler Sensor wird lokalisiert. Das größte Problem bei der Lokalisierung mit Permanentmagneten stellt die Reichweite des Systems dar. Aktuelle Versuche zeigen, dass etwa ein Messbereich von 1 m^3 abgedeckt werden kann.

3.6.4 Anwendbarkeit und verfügbare Produkte

Die beiden magnetische Trackingverfahren, welche die geforderte Messgenauigkeit von 5 mm erfüllen, sind in der Lage einen Messbereich von 4-5 Metern abzudecken. Daher kommen diese Systeme nur für die relative Positionierung der Person gegenüber des FFZ in Frage. Vergleiche dazu Abschnitt 3.4.3. Das bedeutet, dass die Quelle des Magnetfeldes am Stapler und mehrere Sensoren an der Person angebracht werden müssen. Mit diesem Aufbau könnte die relative Pose der Person ermittelt werden. Eine offene Frage besteht noch darin, inwiefern metallische Gegenstände im Messbereich (z.B.: Stapler selbst oder metallische Dosen die bereits auf der Palette gestapelt wurden) die Messqualität beeinflussen.

Name	Jahr	Genauigkeit	Abdeckung	Technologie
track STAR	2011	1-4 mm	4,2 m	DC - Spulen
Liberty	2011	0,7 mm	1,5 - 5 m	AC Magnetfeld

Tabelle 3.4: Produkte Magnetisches Tracking [Mau12]

Es ist zu beachten, dass die beiden Produkte „track STAR“ und „Liberty“ Kabelverbindungen benötigen. Das Produkt Liberty LATUS von Polhemus benötigt keine Kabel.

3.7 Kombinierte Polare Systeme

Derartige Systeme werden primär für Vermessungsaufgaben verwendet, da sie eine besonders hohe Messgenauigkeit, die im Hundertstelmillimeter Bereich liegt, aufweisen. Da diese Systeme in der Regel teuer sind, wurden sie in der

Vergangenheit nicht als *Indoor Positionierungssysteme* betrachtet. Dennoch soll hier die prinzipielle Möglichkeit aufgezeigt werden, diese Technologien fürs Tracking zu verwenden. Kombinierte Polare Systeme werden sowohl zur Winkel- als auch zu Distanzmessung verwendet. Dies basiert einerseits auf der Time of Arrival Methode gemeinsam mit mechanischen oder optischen Signalquellen oder auf der Messungen eines rotierenden Strahls. Zu diesen Systemen zählen sowohl *Laser Tracker* als auch *Laser Scanner*, welche für Präzisionsmessungen verwendet werden. Diese Systeme können ebenfalls für Trackingaufgaben verwendet werden, sind jedoch kostspielig.

3.7.1 iGPS

Prinzipiell ist *iGPS* ein laserbasiertes 3D Messsystem, welches im industriellen Bereich für Hochpräzisionsmessungen verwendet wird. Das System besteht aus zwei, oder mehr, statisch montierten Transmittern, welche jeweils kontinuierlich zwei fächerförmige Laser Strahlen sowie einen Infrarot Impuls als Referenzsignal aussenden. Aufgrund der unterschiedlichen Ankunftszeiten der drei Signale beim Receiver kann sowohl der horizontale als auch der vertikale Winkel des Receivers relativ zum Transmitter ermittelt werden. Um die Position eines Receivers feststellen zu können, müssen Signale von mindestens zwei Transmittern empfangen werden. Zusätzlich müssen die Positionen der Transmitter im Zuge des System Setups exakt vermessen werden. Das heißt, dass für den hier angestrebten Anwendungsfall die gesamte Lagerhalle mit Transmittern ausgerüstet werden müsste. Um sowohl Position als auch Orientierung messen zu können, werden zwei Receiver, die an einem Stab fix montiert sind, benötigt.

Laut Hersteller *Nikon Metrology* kann in einem Messbereich von 1200 m^2 eine Messgenauigkeit von $0,2\text{ mm}$ erreicht werden. Dabei sind zwischen vier und acht Transmitter im Einsatz. Für Tracking von beweglichen Objekten konnte laut [Dep10] eine Genauigkeit von $0,3\text{ mm}$ bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s erreicht werden. In Abbildung 3.15 sind ein iGPS Transmitter sowie ein Sensor dargestellt.



Abbildung 3.15: iGPS Transmitter und Sensor [Mau09]

3.7.2 Anwendbarkeit und verfügbare Produkte

Kombinierte polare Systeme werden primär für Vermessungsaufgaben verwendet und weisen daher, im Vergleich zu den anderen vorgestellten Technologien, eine exzellente Messgenauigkeit auf. Prinzipiell können sie auch für Trackingaufgaben verwendet werden, jedoch sind die Anschaffungskosten dafür in der Regel zu hoch. *iGPS* ist als jene Technologie zu erwähnen, welche am ehesten für Trackingaufgaben verwendet werden kann. Zu beachten ist, dass für eine Positionsbestimmung ein direkter Sichtkontakt zwischen Receiver und mindestens zwei Transmittern benötigt wird. Würde man die gesamte Lagerhalle mit ausreichend vielen Transmittern ausstatten, so könnte man sowohl die Position des Flurförderfahrzeuges als auch jene der Person bestimmen. Als Alternative wäre zu überlegen, ob die Transmitter auch am FFZ angebracht werden können. Eine denkbare Möglichkeit wäre die Montage eines Rahmens am FFZ, der über die Gabeln hinausragt. Vergleiche dazu Abschnitt 3.4.3.

Kapitel 4

Evaluierung Trackingvarianten

Als Basis für die Auswahl und Evaluierung der passenden Trackinglösung für die in Abschnitt 3.1 beschriebene Trackingaufgabe dienen die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Trackingtechnologien. Als erster Auswahlsschritt wurde festgelegt, dass das Tracking der Person relativ zum FFZ realisiert werden soll. Dieser Ansatz wird in weiterer Folge als *lokales System* bezeichnet, da hierbei das Tracking der Person nur im näheren Umfeld des FFZ möglich ist. Alternativ könnten sowohl die Person als auch das FFZ im gesamten Lagerbereich getrackt werden, um anschließend die Pose der Person relativ zum FFZ, und somit zur Zielpalette, zu berechnen. Dieser Ansatz wird als *globales System* bezeichnet. Der Einsatz eines *globalen Systems* hätte folgende Nachteile:

- Ausrüstung des gesamten Lagers mit Trackinginfrastruktur.
- Zusätzlicher Messfehler durch Tracking von Person und FFZ.

Wie bereits erwähnt wurde aus diesen Gründen entschieden, das Tracking der Person relativ zum FFZ zu realisieren. Allgemein kann man festhalten, dass die meisten Trackingtechnologien sowohl eine Elektronik zur Datenerfassung (Sensorik) als auch Marker (in welcher Form auch immer) verwenden. Die Elektronik kann nun entweder am FFZ oder an der Person angebracht sein. Analog dazu befinden sich die Marker an der Person bzw. am FFZ. Befindet sich die Sensorik (Optische Kamera, IR-Kamera oder ähnliches) an der

Person selbst, so spricht man vom sogenannten *Inside-Out Tracking*. Umgekehrt handelt es sich um *Outside-In Tracking*, wenn die Sensoren (Kameras usw.) an fixen Positionen angebracht sind und bewegliche Marker (an der Person) getrackt werden.

Das Funktionsprinzip des Inside-Out als auch des Outside-In Trackings ist in Abbildung 4.1 anhand eines optischen Trackingsystems dargestellt. Diese Prinzipien gelten für alle Trackingtechnologien, die mithilfe von Markern (in welcher Form auch immer) arbeiten.

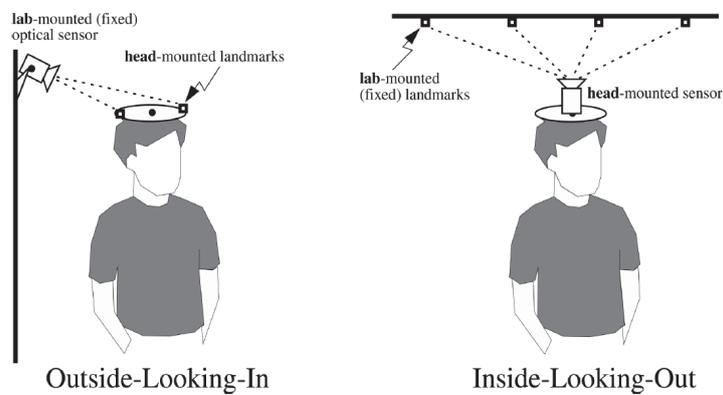


Abbildung 4.1: Funktionsprinzip Inside-Out/Outside-In Tracking [WBV⁺01]

Die bereits beschriebene Vorauswahl des *lokalen Systems* ist in Abbildung 4.2 veranschaulicht. Zudem sind hierbei die für die Evaluierung ausgewählten Trackingtechnologien ersichtlich (Einrahmung).

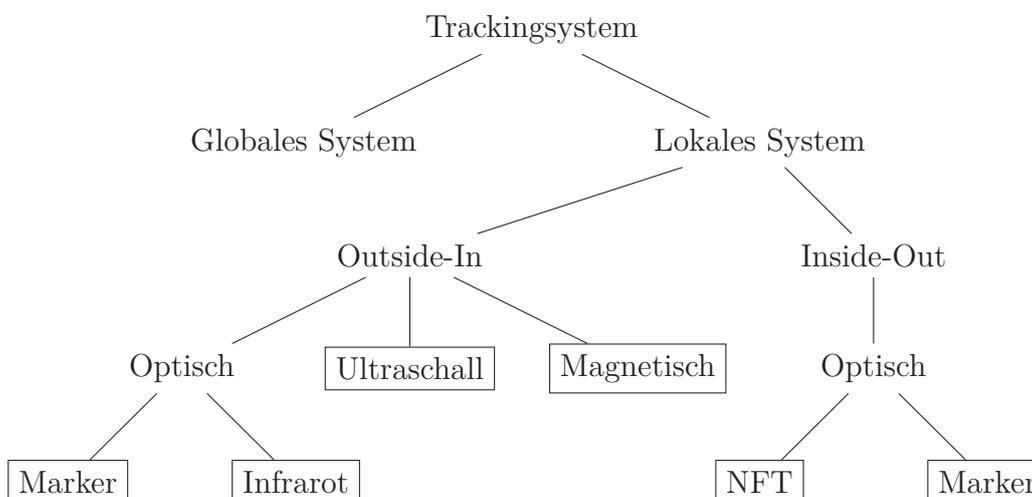


Abbildung 4.2: Übersicht Vorauswahl der Trackingmethoden

In folgender Auflistung sind die für die Evaluierung ausgewählten Technologien nochmals angeführt.

1. Optisches Tracking
 - (a) Natural Feature Tracking (NFT)
 - (b) Markertracking
2. IR-Tracking
 - (a) Aktives IR-Tracking
 - (b) Passives IR-Tracking
3. Ultraschall Tracking
4. Magnetisches Tracking

Pro Technologie wurde mindestens ein Lösungsvorschlag erarbeitet. Die Bewertung dieser Varianten wurde unter Verwendung des *Analytical Hierarchy Process (AHP)* (siehe Abschnitt 4.2) durchgeführt. Hierfür wurde ein umfangreicher Kriterienkatalog definiert (siehe Abschnitt 4.1). Die Gewichtungen der einzelnen Kriterien wurden ebenfalls mit Hilfe des AHP ermittelt.

4.1 Definition der Evaluierungskriterien

Für die Evaluierung der einzelnen Trackingvarianten werden folgende Gesichtspunkte betrachtet:

1. Funktionale Bewertung
2. Technische Systemeigenschaften
3. Kostenbetrachtung
4. Ergonomie - Trackingsystem an der Person
5. Trackingsystem am FFZ
6. Design
7. IT-technischer Implementierungsaufwand
8. Arbeitssicherheit /-tauglichkeit

Pro Kriteriengruppe wurden unterschiedliche Subkriterien definiert, welche als Grundlage für die Durchführung des AHP dienen. Diese Subkriterien sind in weiterer Folge angeführt und beschrieben.

4.1.1 Technische und funktionale Bewertung

Anhand der hier definierten Kriterien werden die Trackingvarianten bzgl. ihrer Funktion bewertet. Hierbei ergeben sich folgende Anforderungen/Entscheidungskriterien an das Trackingsystem.

Genauigkeit - Position

Genauigkeit der Positionsbestimmung. Das heißt wie genau kann die Kopfposition (x, y und z Koordinate) der Person ermittelt werden. Verglichen werden die Messgenauigkeiten bei einem Abstand von 1 m zwischen Mensch und Palette.

Genauigkeit - Orientierung

Genauigkeit der Orientierungsbestimmung. Das heißt wie genau kann die Blickrichtung (die drei Rotationsfreiheitsgrade) der Person ermittelt werden. Ebenso gemessen bei einem Abstand von 1 m zwischen Mensch und Palette.

Trackingbereich

Der Trackingbereich ist die Fläche bzw. das Volumen, in dem das System die relative Pose der Person zur Zielpalette bestimmen kann.

Freiheitsgrade

Um die Position und die Orientierung eines Objekts im Raum bestimmen zu können, ist es nötig alle sechs Freiheitsgrade (6 DOF) zu bestimmen. Ist ein Trackingsystem nicht in der Lage alle 6 DOF zu ermitteln, so kommt es für den in dieser Arbeit behandelten Anwendungsfall nicht in Frage.

Latenzzeit

Unter Latenzzeit versteht man in diesem Zusammenhang die Zeitdifferenz zwischen dem Erfassen der Messdaten durch die Sensorik und der erfolgreichen Berechnung der Pose. Dieses Kriterium spiegelt somit den benötigten Rechenaufwand wieder und hat großen Einfluss auf die *Echtzeitfähigkeit* der Trackinglösungen.

Messrate

Die Messrate definiert, mit welcher Frequenz [Hz] das Trackingsystem die Messdaten erfasst. Dieses Kriterium hat somit ebenfalls großen Einfluss auf die *Echtzeitfähigkeit* des Trackingsystems.

Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit versteht man in diesem Zusammenhang die Resistenz des Systems gegenüber wechselnden Umweltbedingungen wie z.B.: wechselnden Licht- oder Temperaturbedingungen. Ebenfalls wird hierbei berücksich-

tigt, ob das System durch bestimmte Gegenstände im Umfeld, wie zum Beispiel Metall, negativ beeinflusst wird.

Robustheit

Die Robustheit eines Systems beschreibt in diesem Fall die Fähigkeit, bei kurzzeitig fehlenden Messergebnissen bzw. falschen Messungen weiterhin zu funktionieren, sobald wieder Messdaten zur Verfügung stehen.

Möglichkeit mehrere Personen zu Tracken

Ist es möglich, mit dem Trackingsystem mehrere Personen innerhalb eines Trackingbereiches zu Tracken und diese auch zum richtigen FFZ zuzuordnen?

Probleme bei Überlappung der Trackingbereiche zweier Systeme

Kommt es zu Problemen wenn sich die Messbereiche zweier (oder mehrerer) Systeme (FFZ) räumlich überschneiden?

4.1.2 Technische Systemeigenschaften

Die Subkriterien dieser Kriteriengruppe dienen der Bewertung der technischen Eigenschaften der einzelnen Trackinglösungen.

Energieversorgung - System an Person

Ist es notwendig, dass das an der Person angebrachte System mit Energie versorgt wird? Wenn ja, ist zu bewerten wie diese Versorgung realisiert wird.

Energieversorgung - System am FFZ

Ist es notwendig, dass das am FFZ angebrachte System mit Energie versorgt wird? Wenn ja, ist zu bewerten wie diese Versorgung realisiert wird.

Hardware Anschlussmöglichkeiten

Welche Hardware-Anschlussmöglichkeiten bietet das Trackingsystem?

Software Schnittstellen

Welche Softwareinterfaces stehen zur Verfügung?

Tiefkühlager Tauglichkeit

Ist es möglich das Trackingsystem in einem Tiefkühlager (bis zu -30° C) einzusetzen?

4.1.3 Kostenbetrachtung

Mit Hilfe dieser Kriterien sollen die Kosten der einzelnen Trackinglösungen verglichen werden. Die anfallenden Kosten werden pro System (FFZ und Person) erfasst.

Anschaffungskosten

Kosten für die Ausrüstung (Hard- und Software) eines Systems, bestehend aus Person und dazugehörigem FFZ.

Inbetriebnahmekosten

Welche Kosten fallen bei der Inbetriebnahme an? Hierbei ist vor allem darauf zu achten, wie aufwändig es ist ein System zu kalibrieren.

Wartungs- und Betriebskosten

Berücksichtigung der im laufenden Betrieb anfallenden Kosten.

Testkosten

Kosten für die Durchführung eines Funktionstests der Trackinglösung.

4.1.4 Ergonomie

Hierbei wird das am Kopf der Person angebrachte Trackingsystem hinsichtlich seiner ergonomischen Eigenschaften bewertet.

Gewicht

Bewertung des Gesamtgewichtes der an der Person angebrachten Komponenten des Trackingsystems.

Abmessungen

Bewertung der Abmessungen der an der Person angebrachten Komponenten des Trackingsystems.

Anzahl der Komponenten an Person

Wie viele Komponenten (einzelne Sensoren oder Marker) müssen am Kopf der Person angebracht werden?

Kabelverbindung

Sind Kabelverbindungen zu den einzelnen Sensoren/Markern, die am Kopf der Person angebracht sind, notwendig?

Industrietauglichkeit

Sind die an der Person angebrachten Komponenten industrietauglich?

4.1.5 Trackingsystem am FFZ

Diese Subkriterien dienen der Bewertung der am FFZ angebrachten Trackinginfrastruktur.

Anpassungsaufwand am FFZ

Welche Anpassungen müssen am FFZ getroffen werden, um die notwendige Hardware des Trackingsystems am FFZ anbringen zu können?

Anzahl der Komponenten

Wie viele Komponenten müssen am FFZ angebracht werden, um den gesamten Bereich rund um die Palette abdecken zu können?

Gewicht

Bewertung des Gesamtgewichtes der am FFZ angebrachten Komponenten des Trackingsystems.

Abmessungen

Bewertung der Abmessungen der am FFZ angebrachten Komponenten des Trackingsystems.

Industrietauglichkeit

Sind die am FFZ angebrachten Komponenten industrietauglich?

Funktionserfüllung wenn FFZ in Bewegung

Erfüllt das Trackingsystem die geforderten Messgenauigkeiten und Echtzeitanforderungen, wenn das FFZ in Bewegung ist?

4.1.6 Design

Dieses Kriterium dient zur Bewertung des Designs der einzelnen Trackinglösungen. Dabei wird unterschieden zwischen dem Design des Trackingsystems an der Person bzw. am FFZ.

4.1.7 IT-technische Aufwände nach Aufgabenfeldern

Abschätzung der IT-technischen Aufwände die pro Variante anfallen. Hierbei soll festgestellt werden, ob am Client und/oder am Server von *KiSoft Vision* Implementierungsaufwand entsteht, wenn das jeweilige System in *KiSoft Vision* integriert wird.

4.1.8 Arbeitssicherheit und Arbeitstauglichkeit

Gesundheit

Kann das System im Dauereinsatz (8 bis 10 Stunden pro Tag) ohne negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Person eingesetzt werden?

Zulassung

Ist das System für den Einsatz im Lager zugelassen?

Datenschutz

Könnte das System prinzipiell zur Mitarbeiterspionage missbraucht werden?

4.2 Der Analytical Hierarchy Process (AHP)

Der Analytical Hierarchy Process (AHP) ist ein Tool, das zur Entscheidungsfindung bei multikriteriellen Problemen angewendet wird. Beim AHP können sowohl subjektive Faktoren (z.B.: Design) als auch objektive Faktoren (z.B.: technische Daten) berücksichtigt werden. In [MH12] wird der AHP wie folgt beschrieben:

„Der AHP ist - einfach gesagt - ein Prozess, durch den komplexe Entscheidungen strukturiert und evaluiert werden, um dadurch zu einer systematischen, optimalen und rational nachvollziehbaren Entscheidung zu gelangen.“

Zu aller erst muss das Problem, in unserem Fall die Auswahl eines Tracking-systems, in eine Hierarchie von Kriterien zerlegt werden. Die erste Kriterien-ebene besteht in diesem Fall aus folgenden Kriterien:

1. Funktionale Bewertung
2. Technische Systemeigenschaften
3. Kostenbetrachtung

4. Ergonomie - Trackingsystem an der Person
5. Trackingsystem am FFZ
6. Design
7. IT-technischer Implementierungsaufwand
8. Arbeitssicherheit /-tauglichkeit

Pro Kriterium sind weitere Sub-Kriterien definiert. Diese sind in Abschnitt 4.1 aufgelistet und beschrieben. Pro Hierarchieebene werden die jeweiligen Kriterien mithilfe von Paarvergleichen gewichtet. Für die paarweise Bewertung der einzelnen Kriterien stehen die ganzen Zahlen 1 bis 9 sowie deren Reziprokwerte zur Verfügung. Diese sind in Tabelle 4.1 beschrieben.

4.2.1 Berechnung der Kriteriengewichte

Mithilfe der durchgeführten Paarvergleiche können die Kriteriengewichte ermittelt werden. Dieser Vorgang ist in [Saa90] ausführlich beschrieben. Das prinzipielle Problem das durch den Einsatz der Paarvergleichsmethode entsteht ist, dass die resultierende Matrix in der Regel nicht konsistent ist. Für eine konsistente Matrix muss folgende Bedingung aus 4.1 erfüllt sein:

$$a_{jk} = a_{ik}/a_{ij}, \quad i, j, k = 1, \dots, n \quad (4.1)$$

Vergleicht man 3 Kriterien A, B und C und bewertet A:B mit 2 und B:C mit 3, so müsste der Vergleich von A:C 6 ergeben. Es ist jedoch zu beobachten, dass Menschen bei Paarvergleichen in der Regel nicht konsistent entscheiden. Die Berechnung der Gewichte wird anhand eines konsistenten Beispiels gezeigt.

Es sollen n Steine A_1, \dots, A_n bezüglich ihrer Gewichte w_1, \dots, w_n verglichen werden. Diese Gewichte sind bekannt. Somit kann eine Paarvergleichsmatrix A gebildet werden, deren i -te Reihe jeweils die Gewichtsverhältnisse von Stein A_i zu allen Steinen $1 \leq i \leq n$ beinhaltet.

Mögliche Werte für Paarvergleichsurteile a_{ij}	Interpretation der möglichen Werte für Paarvergleichsurteile a_{ij}	
	Beurteilung von Alternativen in Bezug auf ein Kriterium	Beurteilung der relativen Bedeutung von Kriterien
1	gleiche Kriterienausprägung der beiden Alternativen i und j	gleiche Bedeutung der beiden Kriterien i und j
3	etwas höhere Kriterienausprägung der Alternative i	etwas höhere Bedeutung des Kriteriums i
5	deutlich höhere Kriterienausprägung der Alternative i	deutlich höhere Bedeutung des Kriteriums i
7	viel höhere Kriterienausprägung der Alternative i	viel höhere Bedeutung des Kriteriums i
9	sehr viel höhere Kriterienausprägung der Alternative i	sehr viel höhere Bedeutung des Kriteriums i
2,4,6,8	Zwischenwerte	
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Reziprokwerte für „inverse“ Präferenzen, bei denen die Alternative oder das Kriterium j gegenüber der Alternative oder dem Kriterium i bevorzugt wird.	

Tabelle 4.1: AHP-Skala für Paarvergleichsurteile [ZP06]

$$\begin{array}{c}
 A_1 \quad A_2 \quad \dots \quad A_n \\
 A_1 \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}
 \end{array} \quad (4.2)$$

Gleichung 4.2 lässt sich in Matrixschreibweise als $A\vec{w} = n\vec{w}$ anschreiben. Wenn n ein Eigenwert der Matrix A ist, dann ist \vec{w} der zu n korrespondierende Eigenvektor der Matrix A . Aufgrund der konsistenten Paarvergleiche folgt, dass die Matrix A den Rang 1 hat. Daher gibt es nur einen Eigenwert $\neq 0$. Zusätzlich gilt: $\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{Spur}(A)$, wobei $\lambda_i, 1 \leq i \leq n$ alle Eigenwerte der Matrix A sind. Da alle Elemente der ersten Hauptdiagonalen von A den Wert 1 haben, folgt $\text{Spur}(A) = n$. Das heißt n ist der einzige Eigenwert von A . In allgemeinen Entscheidungsproblemen sind die Werte w_i/w_j meist nicht bekannt. Diese Verhältnisse können nur geschätzt werden. Beim AHP werden hierfür die Werte aus Tabelle 4.1 verwendet. Wie bereits erwähnt, wird diese Beurteilung im Allgemeinen nicht konsistent sein, was zur Folge hat, dass der Eigenwert der Matrix A ungleich n ist. Es ist folgendes Eigenwertproblem zu lösen: $A\vec{w} = \lambda_{max}\vec{w}$, wobei λ_{max} der Haupteigenwert von A ist. Der zu λ_{max} korrespondierende Eigenvektor \vec{w} ist der ermittelte Gewichtungsvektor. λ_{max} kann zudem auch verwendet werden, um die Konsistenz der Paarvergleichsmatrix zu beurteilen. Dies wird anhand zweier Kennwerten gemessen: der *CI-Wert* (consistency index) und der *CR-Wert* (consistency ratio). Je größer die Diskrepanz zwischen λ_{max} und n ist, desto inkonsistenter ist die Matrix. Es gilt: $\lambda_{max} \geq n$. Der CI-Wert berechnet sich nach Gleichung 4.3.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.3)$$

Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Inkonsistenz der Matrix in der Regel mit n zunimmt. Es ist beispielsweise viel schwieriger eine 9x9 Matrix konsistent zu bewerten, als eine 3x3 Matrix. Daher wird der CI-Wert mit dem Konsistenzindex von Matrizen verglichen, bei denen die Werte zufällig eingegeben wurden. Diese sogenannten *R-Werte* sind in Tabelle 4.2.1 aufgelistet.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Tabelle 4.2: Zufallskonsistenz R bei gegebener Matrixgröße n [MH12]

Der CR-Wert wird nach Gleichung 4.4 berechnet.

$$CR = \frac{CI}{R} \quad (4.4)$$

Laut [Saa90] kann der Gewichtsvektor \vec{w} akzeptiert werden, wenn $CR \leq 0.1$ gilt. In diesem Fall wirkt sich die Inkonsistenz der Matrix A nicht negativ auf den Evaluierungsvorgang aus.

4.2.2 Gruppenentscheidung

Der AHP bietet die Möglichkeit die Meinungen mehrerer Personen in die Berechnung der Kriteriengewichte einfließen zu lassen. Dazu müssen alle beteiligten Personen eigenständig die Paarvergleichsmatrizen nach eigenem Ermessen ausfüllen. Anschließend werden die geometrischen Mittelwerte der jeweiligen Paarvergleiche berechnet. Durch dieses Vorgehen bleibt die gemittelte Matrix reziprok. Diese gemittelten Paarvergleichsmatrizen dienen als Input für die Berechnung der Kriteriengewichte. Diese und andere Möglichkeiten zur Durchführung einer Gruppenbewertung mithilfe des AHP sind in [MH12] beschrieben. Sowohl für die Berechnung der geometrischen Mittelwerte als auch für die Berechnung der Gewichte wurde *MATLAB* verwendet.

4.2.3 Bewertung der Alternativen

Wie bereits erwähnt können unter Verwendung des AHP sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien bewertet werden. Als Basis hierfür müssen sämtliche Kriterienausprägungen der einzelnen Alternativen ermittelt werden.

Behandlung quantitativer Daten

Beim AHP können quantitative Daten direkt übernommen werden (vgl. dazu [MH12]). Es muss jedoch darauf geachtet werden, wie die „Höhe“ der einzelnen Werte interpretiert wird. Hohe Kosten werden beispielsweise eine geringere Präferenz bekommen als niedrigere. Daher ist in diesem Fall bei der Berechnung der normierten Bedeutungsgewichte der Reziprokwert der Kriterienausprägung zu wählen. Die Kriterienausprägungen a_i werden in Verhältniszahlen w_i nach Gleichung 4.5 umgerechnet.

$$w_i = \frac{a_i}{a_1 + a_2 + \dots + a_n}, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

Diese Berechnung entspricht einer Normierung der Kriterienausprägungen auf 1. Wie bereits erwähnt, müssen die Reziprokwerte a_i^{-1} für die Berechnung verwendet werden, wenn niedrigere Ausprägungen eine höhere Präferenz bekommen sollen.

Bewertung qualitativer Daten

Qualitative Daten können beim AHP ebenso bewertet werden. Hierfür kann wiederum die Paarvergleichsmethode analog zur Berechnung der Kriterienbewertungen verwendet werden.

4.2.4 Ermittelte Kriteriengewichte

Für die Ermittlung der Kriteriengewichte der Haupt- und Subkriterien wurden sechs Personen unterschiedlicher Fachrichtungen gebeten die jeweiligen Paarvergleichsmatrizen nach ihrem persönlichem Ermessen auszufüllen. Die Auswertung dieser einzelnen Bewertungen wurde, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, durchgeführt. Die daraus resultierenden Kriteriengewichte sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Haupt- und Subkriterien	Gewichtung
Funktionale Bewertung	22,64 %
Genauigkeit - Position	16,31 %
Genauigkeit - Orientierung	14,95 %
Trackingbereich	10,89 %
Messrate	10,38 %
Latenzzeit	12,60 %
Robustheit	8,26 %
Zuverlässigkeit	10,79 %
Mehrere Personen tracken	4,58 %
Überlappung Messbereiche	11,24 %
Technische Eigenschaften	10,68 %
Energieversorgung - System an Person	33,56 %
Energieversorgung - System am FFZ	9,32 %
Hardware Anschlussmöglichkeiten	25,61 %
Software Schnittstellen	23,62 %
Tiefkühltauglichkeit	7,89 %
Kostenbetrachtung	19,54 %
Anschaffungskosten	49,20 %
Inbetriebnahmekosten	18,17 %
Wartungs- und Betriebskosten	23,71 %
Testkosten	8,92 %
Ergonomie	12,03 %
Gewicht	23,15 %
Abmessungen	18,10 %
Anzahl der Komponenten	6,10 %
Kabelverbindungen	10,63 %
Industrietauglichkeit	42,03 %
Trackingsystem am FFZ	4,49 %
Anpassungsaufwand am FFZ	9,66 %
Anzahl der Komponenten	8,06 %
Gewicht	8,08 %
Abmessungen	10,20 %
Industrietauglichkeit	49,93 %
Funktionserfüllung in Bewegung	14,08 %
Design	4,53 %
System an Person	87,12 %
System am FFZ	12,88 %
IT-Aufwände	6,55 %
Aufwände am Client	42,02 %
Aufwände am Server	57,98 %
Arbeitssicherheit	19,54 %
Gesundheit	46,71 %
Zulassung	34,65 %
Datenschutz	18,63 %

Tabelle 4.3: Kriterien- und Subkriteriengewichtungen

4.3 Lösungsansätze - Evaluierungskandidaten

Einleitend wird hier nochmals das grundlegende Problem beschrieben. Es soll ein Trackingsystem ausgewählt werden, um die Position und die Orientierung (Pose) eines Kommissionierers relativ zur Zielpalette (die von einem Flurförderfahrzeug transportiert wird) zu ermitteln. Diese Daten sollen in weiterer Folge verwendet werden, um dem Kommissionierer die Ablageposition des aktuellen Kartons im „Head Mounted Display“ zu augmentieren. Die maximale Trackingdistanz beträgt 3 Meter. Das ausgewählte Trackingsystem soll in weiterer Folge in „KiSoft Vision“ integriert werden und das Tracking muss in Echtzeit erfolgen. Als Vereinfachung wurde der Trackingbereich in 2 Teilbereiche unterteilt: Bereich 1 (rot, vgl. Abbildung 4.3): bis zu einem Abstand von 1,5 m zur Palette. In diesem Bereich wird die hohe Messgenauigkeit von ± 5 mm sowie $0,5^\circ$ angestrebt, um in weiterer Folge die Augmentierung der Kartons in ansprechender Art und Weise durchführen zu können. Der äußere Messbereich (gelb, vgl. Abbildung 4.3) liegt zwischen einem Abstand von 1,5 m und 3 m zur Palette. In diesem Bereich wird gefordert, die Person zumindest mit einer Genauigkeit von etwa ± 10 cm zu tracken. Dies ist damit zu erklären, da es in diesem Bereich ausreichend ist, der Person bloß anzuzeigen, wohin sie sich bewegen soll. Eine exakte Augmentierung des Kartons wird hier noch nicht gefordert. Zusätzlich ist in Abbildung 4.3 ein Rahmen über dem Palettenbereich eingezeichnet. An diesem Rahmen kann die für die jeweilige Lösung benötigte Hardware angebracht werden. Anstelle des Rahmens ist auch ein Ausleger denkbar, der mittig über den Paletten verläuft. Wie bereits erwähnt, wurde bereits im Vorhinein eine erste Einschränkung hinsichtlich der verwendeten Trackingtechnologie vorgenommen. Auf dieser Basis wurden potentielle Anbieter sowie Experten aus Wissenschaft und Forschung kontaktiert um Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Diese Lösungsvorschläge sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Anschließend wird jede Variante detailliert beschrieben und die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet. Die Nummer in der ersten Spalte aus Tabelle 4.4 entspricht der Nummer des jeweiligen Abschnitts.

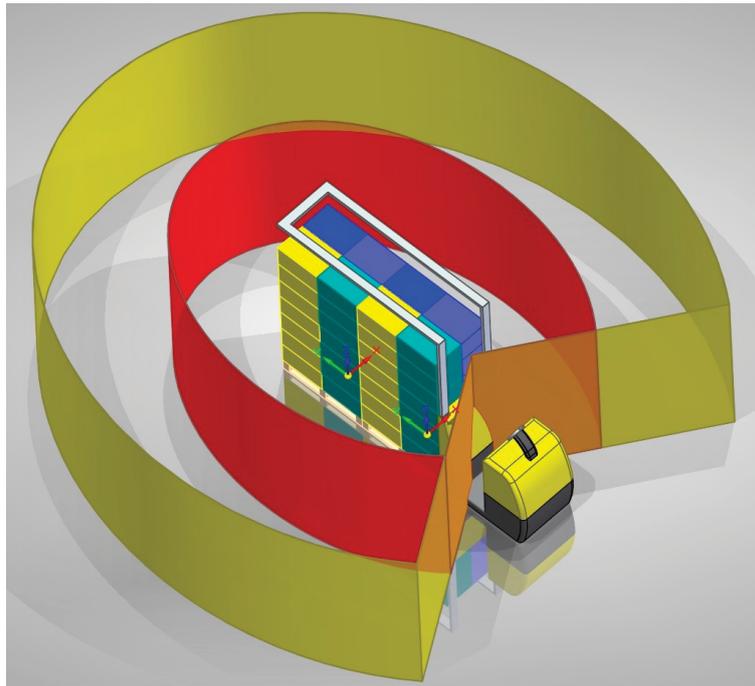


Abbildung 4.3: Flurförderfahrzeug mit Messbereich

#	Name	Technologie	Partner
1	NFT ¹ / Tiefenbild	Optisch	TU Graz
2	NFT / Packbild	Optisch	TU Graz
3	Marker / Inside - Out	Optisch	-
4	Marker / Outside - In	Optisch	-
5	ART ² -SMARTTRACK	Infrarot passiv	ART
6	ART-TRACKPACK	Infrarot passiv	ART
7	Qualisys-Oqus	Infrarot passiv	Qualisys
8	Axios 3D-Cambar	Infrarot passiv	Axios 3D
9	Nexonar US	Ultraschall aktiv	Nexonar
10	Nexonar US/IR	US aktiv und IR aktiv	Nexonar
11	Nexonar US/Marker	US und Optisch	Nexonar
12	Nexonar US/Inertialsensoren	US und Gyroskop	Nexonar
13	Polhemus	Magnetisch	Polhemus

Tabelle 4.4: Lösungsvorschläge

¹Natural Feature Tracking²Advanced Realtime Tracking

4.3.1 NFT / Tiefenbild

NFT basiert auf der Erkennung von zuverlässigen Merkmalen in den von der Videokamera aufgenommenen Bildern. Die notwendigen Koordinateninformationen sind in den sogenannten *Templates* hinterlegt. Diese Templates sind „Ansammlungen“ von Features, wie zum Beispiel Kanten, Ecken oder markanten Oberflächen. Die Herausforderung die beim Einsatz von NFT entsteht ist folgende: Da sich die Gestalt der Palette (inkl. Beladung) durch den Kommissioniervorgang laufend ändert, müssen regelmäßig neue Templates erstellt werden. Als Lösung für dieses Problem bietet es sich an, Tiefenbildkameras über der Palette anzubringen. Mit diesen Kameras kann die aktuelle Palettenszene in 3D rekonstruiert werden. Da bei einem Tiefenbild der Abstand eines jeden Bildpunktes zur Kamera bekannt ist, kann ein Bezug zu einem fixen Koordinatensystem hergestellt werden. Die in der 3D Rekonstruktion erkannten Kanten und Ecken dienen anschließend als Template für das NFT, welches durch die am Kopf der Person angebrachte Kamera durchgeführt wird. Es ist jedoch zu beachten, dass es zu Problemen kommt, wenn die Beladung der Palette eine gewisse Höhe erreicht und die Person keinen Blick mehr auf die umschließenden Kanten hat. Ein weiterer Nutzen, der durch den Einsatz von Tiefenbildkameras entsteht ist, dass dadurch eine Ablagekontrolle realisiert werden kann. Dies kann natürlich nur für Artikel durchgeführt werden, die oben auf die Palette gelegt werden.

4.3.2 NFT / Packbild

Dieser Ansatz entspricht im Prinzip jenem von Abschnitt 4.3.1. Jedoch wird hierbei auf die aktive Template Generierung durch Tiefenbildkameras verzichtet. Als Template wird in diesem Fall das Soll-Packbild der Palette verwendet. Zu jedem Zeitpunkt der Kommissionierung ist prinzipiell bekannt, welche Gestalt die Palette haben soll. Dieses Soll-3D Modell dient in diesem Fall als Template. Jedoch ist zu beachten, dass die zu kommissionierenden Produkte im Soll-Packbild stets durch den umschließenden Quader repräsentiert werden. In der Realität sind diese Einheiten jedoch häufig anders beschaffen (z.B.: Dosen, Flaschen usw.). Des weiteren müsste bei dieser Vari-

ante stets davon ausgegangen werden, dass die Produkte exakt an die richtige Stelle gelegt worden sind. Ansonsten ist das Tracking nicht mehr möglich. Auf Grund dieser großen Unsicherheitsfaktoren wurde diese Variante ausgeschlossen.

4.3.3 Marker / Inside Out

Diese Variante basiert auf dem Einsatz von 2D-Markern (siehe Abbildung 4.4). Dabei kann jener Markertracker der derzeit bei *KiSoft Vision* verwendet wird eingesetzt werden. Zusätzlich zur aktuell am Kopf angebrachten Kamera muss eine zweite Kamera am Kopf montiert werden. Diese blickt schräg nach oben. Die Marker sind an einem Rahmen, der über den Gabelbereich des FFZ ragt, angebracht. Notwendige Daten bzgl. Genauigkeit und Industrietauglichkeit sind anhand von Tests praktisch zu ermitteln.



Abbildung 4.4: 2D Marker

4.3.4 Marker / Outside In

Ebenso wie die in 4.3.3 beschriebene Variante basiert diese Lösung auf dem Einsatz von 2D-Markern. Hierbei kommt ebenfalls der bereits vorhandene Markertracker zum Einsatz. Jedoch kommt es hier zu einer Umkehrung des Tracking-Prinzips. Kameras sind am Rahmen über dem Gabelbereich des FFZ zu montieren, um den Bereich rund um die Palette zu überwachen. Am Kopf der Person sind Marker anzubringen. Aus Gesprächen mit der Firma *Imagination* (Entwickler aktuell verwendeter Markertracker) ergab sich

jedoch die Erkenntnis, dass beim Outside-In Markertracking deutlich größere Winkelmessfehler auftreten als beim Inside-Out Ansatz (vgl. Abschnitt 4.3.3). Bei *Imagination* wurde folgender Test durchgeführt: Ein Marker wurde auf die Rückseite eines Tablets angebracht. Dieser wurde von einer Kamera getrackt, die 1 m entfernt war. Ziel war es anschließend die Trackingdaten zu nutzen, um eine Augmentierung am Bildschirm des Tablets zu machen. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Winkelmessfehler durch das Outside-In Tracking so groß waren, dass keine ansprechende Augmentierung möglich war. Auf Grund dieser Expertenmeinung wurde dieser Lösungsansatz ausgeschlossen.

4.3.5 ART-SMARTTRACK

Dieser Lösungsvorschlag wurde gemeinsam mit dem Anbieter *Advanced Real-time Tracking GmbH* - kurz ART - ausgearbeitet. ART bietet passives Infrarot Tracking an. Dieser Ansatz verwendet die Stereokamera *SMARTTRACK* von ART, welche in Abbildung 4.5 dargestellt ist. Zusätzlich zu zwei Kameras verfügt jede SMARTTRACK über Infrarot Projektoren. Am Kopf der Person sind fünf bis acht passive (reflektierende) Marker anzubringen. Diese sind in Abbildung 4.6 abgebildet.



Abbildung 4.5: ART SMARTTRACK Kamera¹



Abbildung 4.6: ART Marker auf Head Mounted Display¹

¹Bildquelle: <http://www.ar-tracking.com/>

Beim erarbeiteten Lösungsvorschlag sind drei SMARTTRACK - Kameras am FFZ anzubringen. Dafür ist es notwendig, sowohl zwei Steher auf den Seiten des FFZ sowie einen Ausleger mittig über dem Gabelbereich anzubringen. Der dadurch abgedeckte Messbereich ist in Abbildung 4.7 visualisiert.

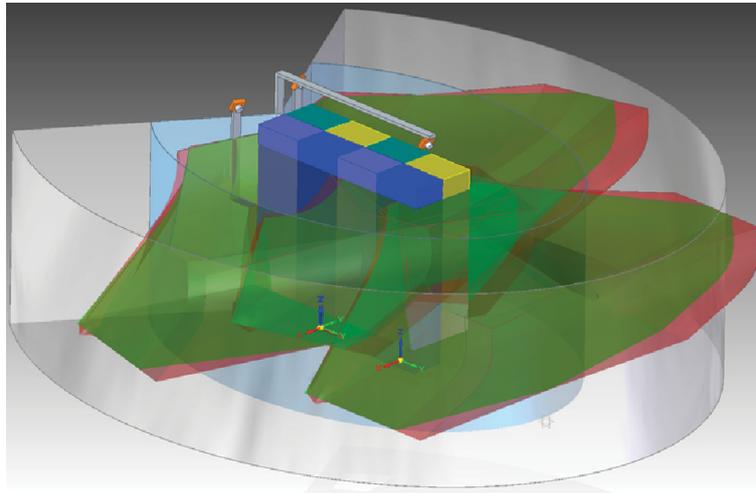


Abbildung 4.7: Visualisierung Messraum ART SMARTTRACK

Die relevanten Daten dieser Variante sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,8-5,5	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,4-1,2	[°]
Messrate	60	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	15.000	[€]
Anpassung am FFZ	2 Steher + Ausleger	-
# Komponenten am FFZ	3	-
System an Person	5-8 passive Marker	-

Tabelle 4.5: Eckdaten ART SMARTTRACK

4.3.6 ART-TRACKPACK

Neben der Lösung mit den Stereokameras wurde gemeinsam mit ART noch ein weiteres Szenario erarbeitet. Hierbei kommen Einzelkameras, die sogenannte *TRACKPACK*-Kamera, zum Einsatz. Jede dieser Kameras ist mit

einem IR-Projektor ausgestattet (siehe Abbildung 4.8). Es ist zu erwähnen, dass stets zwei Kameras die selben Marker im Blickfeld haben müssen, um das Tracking durchführen zu können. Daraus resultiert, dass acht Kameras am FFZ angebracht werden müssen, um den geforderten Messbereich abzudecken. Diese Anordnung ist in Abbildung 4.9 schematisch dargestellt. Am Kopf der Person sind, so wie bei der SMARTTRACK Lösung, ebenfalls fünf bis acht passive Marker anzubringen.



Abbildung 4.8: ART TRACKPACK Kamera¹

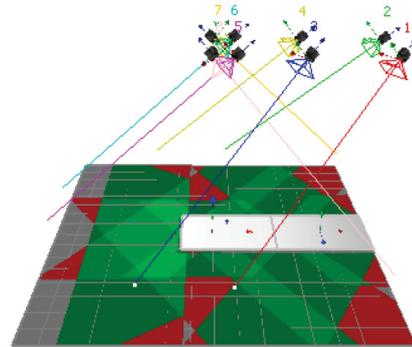


Abbildung 4.9: Anordnung Kameras - ART TRACKPACK

Aus Tabelle 4.6 sind die relevanten Daten dieser Variante zu entnehmen.

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,8-5,5	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,4-1,2	[°]
Messrate	60	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	30.000	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen	-
# Komponenten am FFZ	8	-
System an Person	5-8 passive Marker	-

Tabelle 4.6: Eckdaten ART TRACKPACK

¹Bildquelle: <http://www.ar-tracking.com/>

4.3.7 Qualisys-Oqus

Diese Lösungsvariante wurde gemeinsam mit dem Anbieter *Qualisys AB*, einem Anbieter passiver IR Trackinglösungen erarbeitet. Die *Oqus* Kamera (siehe Abbildung 4.10) von Qualisys ist mit einem IR Projektor ausgestattet. Das Tracking kann nur erfolgen, wenn stets zwei Kameras die selben Marker (siehe Abbildung 4.11) sehen. Zu diesem Zweck müssen fünf bis acht passive IR Marker am Kopf der Person angebracht werden. Um den erforderlichen Messbereich abzudecken sind 14-16 Oqus Kameras notwendig. Diese sind an einem Rahmen über dem Gabelbereich des FFZ anzubringen.



Abbildung 4.10: Qualisys Oqus Kamera¹



Abbildung 4.11: Qualisys Marker¹

In Tabelle 4.7 sind die relevanten Daten für diesen Lösungsvorschlag aufgelistet.

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,1	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,1	[°]
Messrate	180	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	75.000	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen	-
# Komponenten am FFZ	14-16	-
System an Person	5-8 passive Marker	-

Tabelle 4.7: Eckdaten Qualisys Qqus

¹Bildquelle: <http://www.qualisys.com/>

4.3.8 Axios3D-Cambar

Dieser Lösungsvorschlag wurde gemeinsam mit dem Anbieter *Axios 3D Services GmbH* erarbeitet. Dieses Unternehmen bietet passive Infrarot Tracking Lösungen für den Einsatz in der Industriemesstechnik und der Medizintechnik an. Der von Axios vorgeschlagene Lösungsansatz besteht aus drei Cambar-Stereokameras (siehe Abbildung 4.12). Diese sind an einem Rahmen über dem Gabelbereich des FFZ anzubringen. Am Kopf der Person sind 5 bis 8 passive IR Marker (siehe Abbildung 4.13) zu befestigen. Der durch die drei Stereokameras abgedeckte Messbereich ist in Abbildung 4.14 visualisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit diesen drei Kameras der Messbereich nicht ausreichend abgedeckt werden kann.



Abbildung 4.12: Axios3D Cambar¹



Abbildung 4.13: Axios3D Marker¹

Relevante Daten zu dieser Variante sind in Tabelle 4.8 angeführt.

Merkm ^{al}	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,1-0,2	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,2	[°]
Messrate	15-40	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	40.000	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen	-
# Komponenten am FFZ	3	-
System an Person	5-8 passive Marker	-

Tabelle 4.8: Eckdaten Axios3D Cambar

¹Bildquelle: <http://www.axios3d.com/>

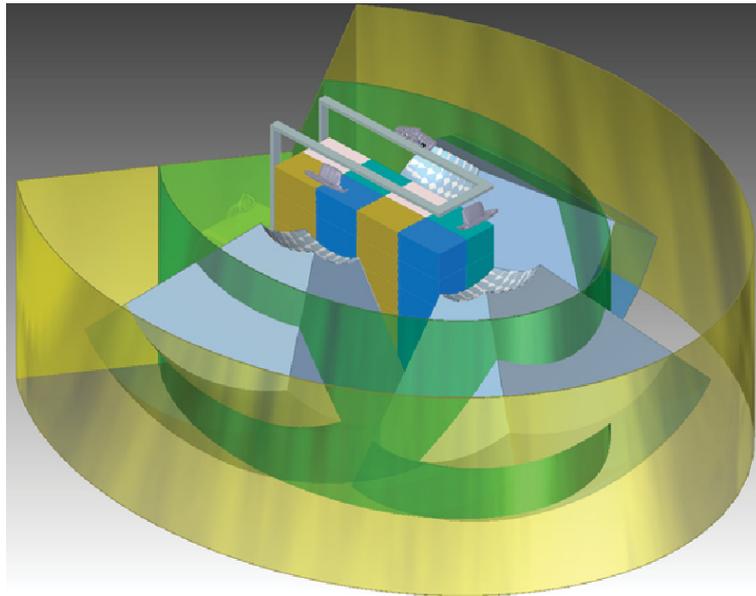


Abbildung 4.14: Visualisierung Messraum Axios3D Cambar

4.3.9 Nexonar US

Nexonar bezeichnet jene Produktpalette, die von der *soft2tec GmbH* - einem Anbieter von Ultraschall (US) Tracking Lösungen - angeboten wird. Deren System basiert auf dem Prinzip des *aktiven US Tracking*, welches in Abschnitt 3.5.1 beschrieben ist. Dabei sind US-Sender, sogenannte Beacons, am Kopf der zu trackenden Person angebracht. Ortsfeste US-Empfänger (Listener) berechnen auf Basis der übermittelten US-Signale die Position und Orientierung der Beacons. Die von Nexonar angebotene Hardware ist in Abschnitt 3.5.3 beschrieben und abgebildet. Um den geforderten Messbereich abzudecken ist es notwendig drei US-Listener am FFZ anzubringen. Hierfür ist ein Rahmen am FFZ erforderlich. Der dadurch abgedeckte Messbereich ist in Abbildung 4.15 visualisiert.

Anhand der Daten in Tabelle 4.9 ist zu erkennen, dass diese Trackingvariante die Anforderungen bzgl. Genauigkeit und Echtzeitfähigkeit erfüllt. Jedoch birgt diese Lösung einen gravierenden Nachteil, der nicht aus der Tabelle hervorgeht. Da alle US-Beacons mit der selben Frequenz senden, kommt es zu Interferenzen, wenn sich zwei oder mehr Personen im selben Messbe-

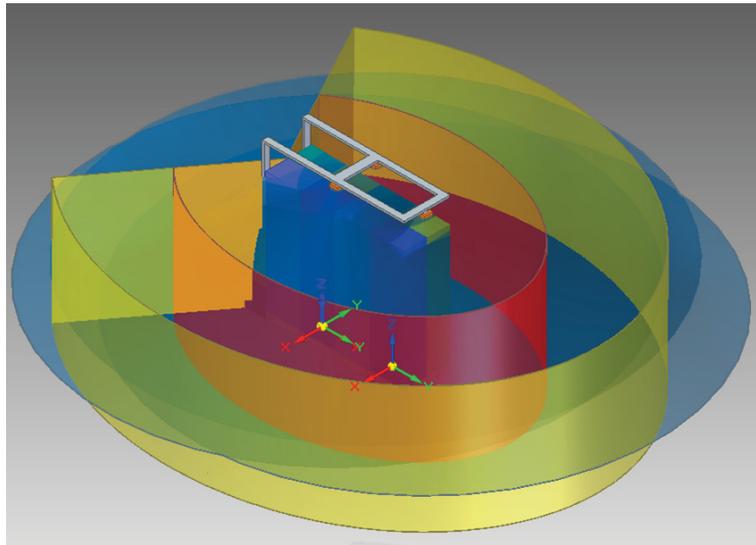


Abbildung 4.15: Visualisierung Messraum Nexonar US

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,1	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,1	[°]
Messrate	30	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	15.000	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen	-
# Komponenten am FFZ	3	-
System an Person	5-8 aktive US-Sender	-

Tabelle 4.9: Eckdaten Nexonar US

reich befinden. Diese Situation kann im Lager leicht auftreten, wenn z.B.: zwei FFZ nahe beieinander stehen. In diesem Fall wäre kein eindeutiges und vor allem genaues Tracking möglich.

4.3.10 Nexonar US / IR

Dieser Lösungsvorschlag wurde von *soft2tec* selbst eingebracht. Wie in Abschnitt 4.3.9 beschrieben, kommt es beim alleinigen Einsatz von US Tracking zu Komplikationen durch Interferenzen. Bei diesem Ansatz ist lediglich ein US-Listener zentral über dem Gabelbereich des FFZ angebracht. Dieser würde somit den Messbereich über den Paletten bis zu einem Abstand von ca. 1 m zur Palette abdecken. Der außen liegende Messbereich wird hierbei durch aktives *IR-Tracking* (vgl. Abschnitt 3.4.2) abgedeckt. Nexonar arbeitet derzeit an der Entwicklung einer eigenen, aktiven IR-Tracking Lösung. Deren Technologie bietet folgenden Vorteil: Für ein erfolgreiches Tracking ist es ausreichend, wenn bloß eine Kamera die aktiven IR-Marker im Blickfeld hat. Deshalb reichen drei Kameras aus, um den übrigen Messbereich abzudecken. Diese wären an einem Rahmen über dem Gabelbereich anzubringen. Die Konfiguration sowie der dadurch abgedeckte Messbereich sind in Abbildung 4.16 visualisiert.

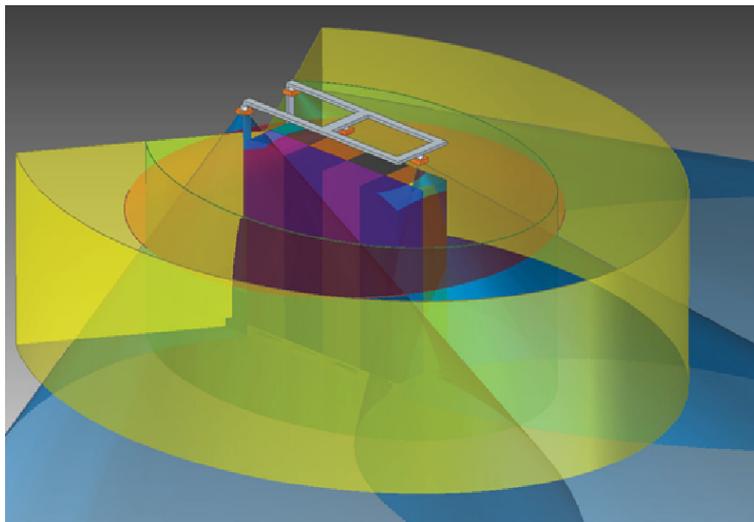


Abbildung 4.16: Visualisierung Messraum Nexonar US/IR Hybridlösung

Die Person hätte in diesem Fall sowohl 5-8 aktive US-Beacons als auch 5-8 aktive IR-Marker an seinem Kopf montiert. Nachteil dabei ist, dass diese mit Strom versorgt werden müssen, und somit zusätzliche Kabelverbindungen am Kopf der Person notwendig werden. Um dem Problem der Interferenzen

entgegenzuwirken, ist das System so konzipiert, dass die US-Beacons beim Verlassen des US-Messbereiches deaktiviert werden. Nähert sich die Person dem US-Messbereich, so werden die Beacons wieder aktiviert. Dieses System ist, so wie hier beschrieben, noch nicht als fertiges Produkt erhältlich. Es wurde jedoch von Nexonar angeboten gemeinsam an der Entwicklung eines Prototypen zu arbeiten. Relevante Daten dieser Variante sind in Tabelle 4.10 angeführt.

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,1 (US und IR)	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,1 (US), 0,5 (US)	[°]
Messrate	30	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	6.000	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen + Querstrebe	-
# Komponenten am FFZ	4 (1 US-Listener, 3 Kameras)	-
System an Person	5-8 aktive US-Sender und IR-Marker	-

Tabelle 4.10: Eckdaten Nexonar US/IR

4.3.11 Nexonar US / Marker

Diese Variante basiert auf der selben Idee wie die in Abschnitt 4.3.10 vorgestellte Hybridlösung. Hierbei ist wiederum ein US-Listener über dem Gabelbereich des FFZ angedacht. Das Tracking außerhalb des US-Messbereiches wird durch Optisches Marker Tracking (Inside-Out) realisiert. Notwendige Marker sind an einem Rahmen über dem Gabelbereich des FFZ anzubringen. Es ist noch zu prüfen, ob die am *KiSoft Vision* Head-Set angebrachte Kamera ausreicht, um die Marker wahrzunehmen oder ob eine zweite Kamera, wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, am Kopf der Person angebracht werden muss. Die relevanten Daten für diese Lösungsvariante sind in Tabelle 4.11 aufgelistet.

Merkmal	Wert	Einheit
Genauigkeit - Position	0,1 (US), Marker ?	[mm]
Genauigkeit - Orientierung	0,1 (US), Marker ?	[°]
Messrate	30	[Hz]
≈ Hardware Kosten / FFZ	3.500	[€]
Anpassung am FFZ	Rahmen + Querstrebe	-
# Komponenten am FFZ	1 US-Listner + Marker	-
System an Person	5-8 aktive US-Sender	-

Tabelle 4.11: Eckdaten Nexonar US/Marker

4.3.12 Nexonar US / Inertialsensoren

Auch dieser Variante liegt die selbe Idee wie den in den Abschnitten 4.3.10 und 4.3.11 beschriebenen Hybridlösungen zu Grunde. Ebenso wäre hier bloß ein US-Listener zentral über dem Gabelbereich anzubringen. Es ist angedacht, dass das Tracking der Person vom Verlassen des US-Messbereichs bis zum Wiedereintritt in den US-Messbereich durch Inertialsensoren realisiert wird. Laut Auskunft von Nexonar weisen Inertialsensoren jedoch bereits nach etwa 5 Sekunden einen großen Messfehler hinsichtlich der Absolutposition auf. Es wäre jedoch denkbar, dass Inertialsensoren in die in 4.3.3 und 4.3.11 beschriebenen Varianten zu integrieren, um jene Momente zu überbrücken, in denen kein Marker von der Kamera am Kopf der Person gesehen werden kann.

4.3.13 Polhemus

Polhemus bietet Magnetische Trackingsysteme an (siehe Abschnitt 3.6). Diese zeichnen sich vor allem durch hohe Messgenauigkeiten aus. Zudem haben sie den Vorteil, dass kein direkter Sichtkontakt zwischen „Sender“ und „Empfänger“ notwendig ist. Jedoch haben sie den Nachteil, dass im Messraum keine metallischen Gegenstände vorhanden sein dürfen, um ein zuverlässiges Tracking durchführen zu können. Aus diesem Grund wurde uns von Polhemus, nach Besprechung unseres Anwendungsfalles, mitgeteilt, dass deren Trackinglösung aus technologischen Gründen nicht geeignet ist. Das FFZ mit

seinen metallischen Komponenten, die Regale sowie etwaige metallische Produkte, die auf die Palette kommissioniert werden, machen einen Einsatz eines magnetischen Trackingsystems nicht möglich. Deshalb wurde diese Variante nicht weiter evaluiert.

4.4 Evaluierungsergebnisse

Um die Objektivität der Evaluierung sicherzustellen, wurden jene Varianten nicht mithilfe des AHP bewertet, bei welchen keine ausreichenden Daten hinsichtlich der Zielkriterien erhoben werden konnten. Dies ist vor allem bei den Optischen Lösungen (NFT, Marker) der Fall, da Daten zu Genauigkeit, Messrate, Latenzzeit usw. für diese System nicht allgemein verfügbar sind. Deshalb wurden rein die „Zukauffösungen“, also jene die gemeinsam mit potentiellen Anbietern erarbeitet wurden, mit Hilfe der AHP bewertet. Das Ergebnis ist in Tabelle 4.12 angeführt.

Rang	Lösung	Punkte
1	Nexonar US/Marker	17,67
2	Nexonar US/IR	15,01
3	Qualisys-Oqus	14,52
4	Axios3D-Cambar	14,04
5	Nexonar US	13,73
6	ART-SMARTTRACK	12,59
7	ART-TRACKPACK	12,44

Tabelle 4.12: Ergebnis Analytic Hierarchy Process

Die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Trackinglösungen wurden im Rahmen einer Diskussion besprochen. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Eckdaten der Lösungsvorschläge sowie des Ergebnisses der Evaluierung (siehe Tabelle 4.12) wurde folgende Entscheidung bzgl. des weiteren Vorgehens festgelegt. Die Variante NFT/Tiefenbild (Abschnitt 4.3.1) wurde als vielversprechendste (nicht durch AHP bewertete) Variante bewertet. Daher soll hierbei geklärt werden, wie eine Umsetzung im Detail erfolgen könnte. Im Zuge dieser Masterarbeit soll ein Prototyp einer Ablagekontrolle - basierend auf einer Tiefen-

bildkamera - entwickelt werden. Diese Aufgabe steht nämlich in engem Zusammenhang mit der Entwicklung eines NFT/Tiefenbild Trackingsystems. Die Entwicklung eines Trackingsystems basierend auf dieser Idee würde den Umfang dieser Arbeit überschreiten.

Zum Anbieter Nexonar wird weiterhin Kontakt gehalten. Dabei geht es primär darum, gemeinsam mit Nexonar (soft2tec) an der Weiterentwicklung konkreter Umsetzungsszenarien zu arbeiten. Zu diesem Zweck wird ein Treffen mit Nexonar vereinbart, um deren Trackinglösungen im Live-Einsatz zu beobachten. Anschließend soll über die gemeinsame Entwicklung eines Prototypen entschieden werden.

Eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse sowie die jeweiligen Ausschlussgründe für die nicht weiter berücksichtigten Varianten sind in Tabelle 4.13 aufgelistet.

#	Lösung	≈ Hardware Kosten/FFZ	Anmerkungen	Ausschlussgrund	weiteres Vorgehen
1	NFT / Tiefenbild	250 - 3.000 €	Ablagebestätigung möglich	-	Schritte für Umsetzung erheben, Ablagekontrolle
2	NFT / Packbild	-	Große Abweichung von realer Palette zu Soll-Packbild	Technologie	-
3	Marker / Outside-In	3.000 €	Große Winkelmessfehler	Technologie	-
4	Marker / Inside - Out	500 €	Genauigkeit erreichbar ?	-	-
5	ART- Smarttrack	15.000 €	nur innerer Messbereich abgedeckt	-	Variante als mögliche Option im Auge behalten, vorerst keine Tests machen
6	ART - Trackpack	30.000 €	-	Preis	-
7	Qualisys	75.000 €	-	Preis	-
8	Axios 3D	40.000 €	Messraum unzureichend abgedeckt	Preis & Technologie	-
9	Nexonar	15.000 €	Interferenzen stören Messung	Technologie	-
10	Nexonar US / IR	6.000 €	Produkt erst in Entwicklungsphase	-	Weitere Zusammenarbeit
11	Nexonar US / Marker	3.500 €	Fusion möglich?	-	Weitere Zusammenarbeit
12	Nexonar US / Inertialsensoren	3.000 €	Fusion möglich?	-	Weitere Zusammenarbeit

Tabelle 4.13: Zusammenfassung Evaluierungsergebnisse

Kapitel 5

Ausgewählte Trackinglösungen

Nach der Evaluierungsphase haben sich im Grunde zwei unterschiedliche Möglichkeiten für die Entwicklung eines Trackingsystems ergeben.

- NFT mit Tiefenbild
- Kooperation mit Nexonar

5.1 NFT mit Tiefenbild

NFT wird auch häufig als „Markerloses Tracking“ bezeichnet, da hierbei keine künstlichen Marker in der Arbeitsumgebung angebracht werden müssen. Das Trackingsystem ist in der Lage auf Grund von *Feature Points* (Kanten, Ecken) die Pose der Kamera zu bestimmen. Diese Feature Points sind im sogenannten *Template* hinterlegt, wo auch geometrische Informationen gespeichert sind. Blickt nun eine Kamera auf ein Objekt, so werden aus dem aktuellen Bild Feature Points extrahiert und mit dem Template abgeglichen. Werden Übereinstimmungen gefunden, so kann die Pose der Kamera errechnet werden.

Für den in dieser Arbeit behandelten Anwendungsfall ergibt sich jedoch folgende Schwierigkeit: Da sich die Gestalt der Palette nach jedem Arbeitsschritt des Kommissionierers ändert, muss das Template laufend aktualisiert werden. Um dies zu realisieren, kann eine Tiefenbildkamera über der Palette

angebracht werden, die laufend ein Template generiert. So können einerseits Feature Points für das Template gewonnen werden und andererseits gelingt es mit Hilfe des Tiefenbildes einen fixen Bezug zum Koordinatensystem des FFZ und somit zur Palette herzustellen. Das von der Tiefenbildkamera generierte Template dient anschließend dazu, um die Kamera am Kopf der Person zu Tracken. Um ein Trackingsystem nach diesem Prinzip zu entwickeln müssen folgende Aufgaben erledigt werden:

1. 3D - Rekonstruktion
2. Template Generierung
3. Tracking der Kopf Pose

Ein derartiges System bietet einen zusätzlichen Mehrwert, da ohne zusätzliche Hardware die Ablagekontrolle realisiert werden kann. Dazu muss lediglich die 3D-Rekonstruktion der Palette mit den im Packbild-File hinterlegten Informationen abgeglichen werden. Außerdem ist dieses System, im Gegensatz zu allen anderen in dieser Arbeit vorgestellten Varianten nicht „blind“. Da das System praktisch laufend ein aktuelles Modell der Palette generiert, können diese Informationen genutzt werden, um die Augmentierung auf der Zielpalette ansprechender zu gestalten.

Ein vergleichbares Trackingsystem ist in [WNDW11] beschrieben. Hierbei wird eine Microsoft Kinect eingesetzt um das Template zu generieren. Getrackt wird ein Smartphone, das sich auf einem mobilen Roboter befindet. Die daraus gewonnen Informationen werden verwendet, um den Roboter zu navigieren.

Dieses System lässt sich auf die hier behandelte Aufgabestellung adaptieren. Wie bereits erwähnt wäre die Tiefenbildkamera über der Palette (mit Blick nach unten) anzubringen. Anstelle des Smartphones am Roboter würde in diesem Fall die Kamera am Kopf des Kommissionierers getrackt werden, sobald dieser seinen Blick auf die Palette richtet. Dieser Ansatz wurde bereits mit Forschungsmitarbeitern der TU Graz besprochen und als realistische Variante bewertet. Für eine mögliche Umsetzung dieser Variante würde sich

eine Kooperation mit der TU Graz anbieten. Laut Einschätzung der Experten an der TU Graz würde die Entwicklung eines ersten Prototypen rund 8 Mannmonate in Anspruch nehmen. Dabei ist bereits berücksichtigt, dass Know-How der TU Graz zugekauft wird.

In Abbildung 5.1 ist, in Anlehnung an [WNDW11] das Systemdesign für den Anwendungsfall im Lager schematisch dargestellt.

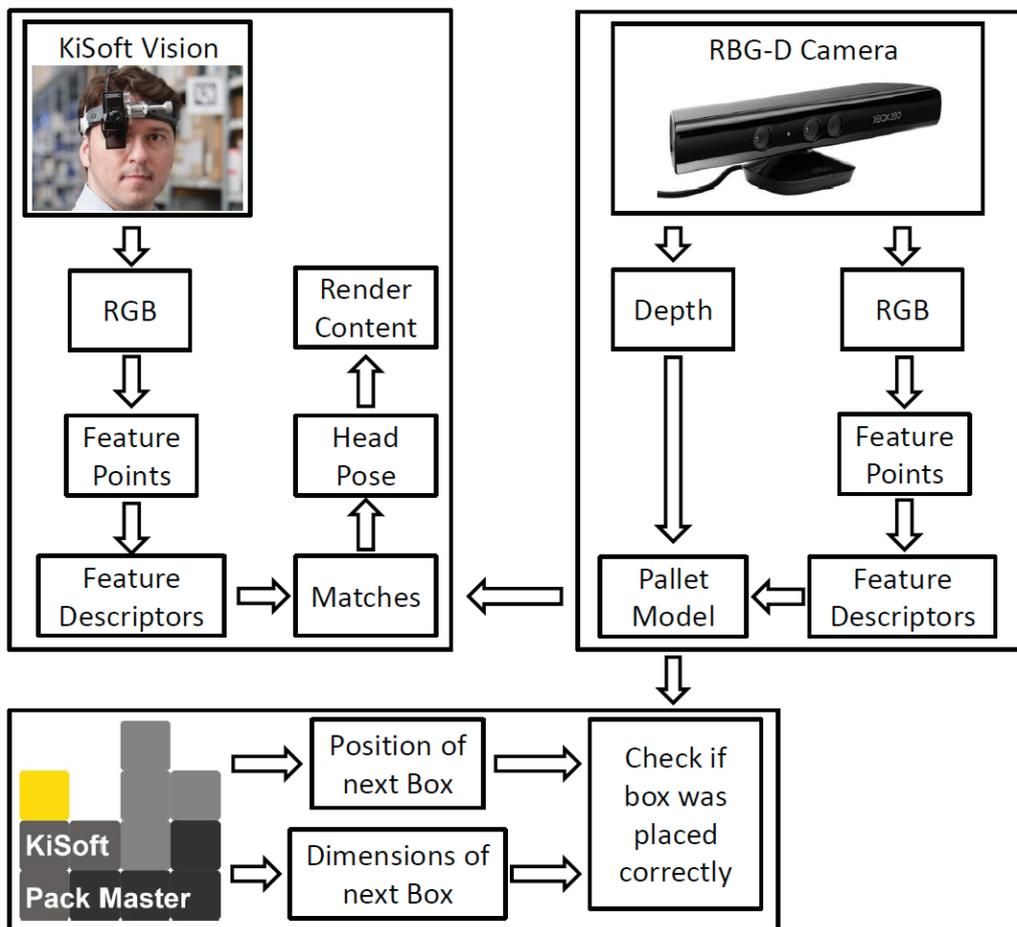


Abbildung 5.1: Systemdesign NFT mit Tiefenbildkamera

Der Begriff *Pallet Model* aus Abbildung 5.1 wird an dieser Stelle als Synonym für die 3D-Rekonstruktion der Palette inklusive Beladung verwendet. Dieses Modell wird, wie bereits beschrieben mit Hilfe einer Tiefenbildkamera generiert und dient als Grundlage für das Tracking Template.

5.2 Kooperation mit Nexonar

Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, haben sich die Lösungen des Unternehmens Nexonar (soft2tec) als vielversprechendste Varianten für die in dieser Arbeit beschriebenen Trackingaufgabe erwiesen. Aus diesem Grund wurde ein Treffen bei Nexonar (Sitz in Frankfurt) vereinbart, um einerseits den aktuellen Stand ihrer Trackinglösungen anhand eines Testaufbaus kennenzulernen und andererseits die in der Evaluierungsphase beschriebenen Trackinglösungen sowie alternative Varianten gemeinsam zu diskutieren. Die Ergebnisse bzw. neu gewonnenen Erkenntnisse dieses Treffens sind in diesem Abschnitt zusammengefasst und sollen für die zukünftige Auswahl der Trackinglösung als Entscheidungsgrundlage dienen.

5.2.1 Trackingtechnologien Nexonar

Nexonar arbeitet mit zwei unterschiedlichen Trackingtechnologien (Ultraschall und Infrarot), welche in deren Trackingsoftware kombiniert werden können.

Ultraschall Tracking

Hierbei sind aktive Ultraschall Beacons an der Person angebracht (mind. drei in definierter Anordnung = „Tracking Target“). Die Ultraschall Signale, die von den Beacons ausgesendet werden, werden von einem Listener empfangen, um anschließend die Pose des Tracking Targets zu berechnen. Der Listener empfängt die Signale mit einer Rate von 30 Hz. Dabei kann die Pose des Trackingtargets auf bis zu 1 mm genau getrackt werden. Um einen größeren Messbereich abzudecken, können bis zu 8 Listener geclustert werden. Hierbei wird ein Listener als Master definiert und die anderen Listener werden relativ zum Master kalibriert. Die Reichweite pro Listener liegt bei etwa 3 m. Der Listener zeichnet sich durch einen großen Öffnungswinkel von ca. 140° aus. Befinden sich 2 Tracking Targets im Messbereich eines Listeners kommt es zu Interferenzen der US-Signale. Tritt dieser Fall ein, ist ein eindeutiges Tracking nicht möglich.

Infrarot Tracking

Die IR-Tracking Lösung von Nexonar ist eine „Single Camera“ Lösung. Das heißt, dass die Pose des Trackingtargets, in diesem Fall eine Platte mit 7 IR-Dioden (etwa so groß wie eine Kreditkarte), berechnet werden kann, wenn nur eine IR-Kamera das Target in ihrem Sichtfeld hat. Im Nahbereich (bis ca. 1,5 m Abstand) können Genauigkeiten von ca. 1-2 mm erreicht werden. Bei einem Abstand von 3-4 m kann das Target auf ca. 2 cm genau getrackt werden. Aktuell ist Nexonar in der Lage mit 3 IR-Kameras bei einer Messrate von 130 Hz zu arbeiten. Das Clustering der IR-Kameras kann so wie bei den US-Listern durchgeführt werden.

5.2.2 Praktische Tests

Zur Demonstration ihrer Trackinglösungen haben die Mitarbeiter von Nexonar einen Testaufbau errichtet (siehe Abbildung 5.2), an welchem sowohl Ultraschall als auch Infrarot Tracking getestet werden konnte. Dieser Testaufbau simulierte hierbei den Bereich, der von 2 Paletten abgedeckt wird (2,4 x 0,8 m). Zwei Infrarot Kameras sind bei einer Höhe von 2,7 m an einer Seite des „Paletten-Bereichs“ angebracht. Diese beiden Kameras decken den Messbereich an einer Seite der Palette ab. Zusätzlich ist eine weitere Kamera bei einer Höhe von 3 m mittig über dem Paletten-Bereich angebracht, um den Bereich an der Vorderseite der Palette abzudecken. Zudem befinden sich zwei US-Listener bei einer Höhe von ca. 2,3 m mittig über dem Paletten-Bereich.

Test - Infrarot Tracking

Um die Funktionsweise des IR-Trackings zu testen wurde das IR-Tracking Target durch den Messbereich bewegt. Dabei stellte sich heraus, dass der geforderte Messbereich abgedeckt werden konnte. Das System war in der Lage die oben beschriebenen Genauigkeiten zu erreichen. Ebenso wurde die Ablage einer Kiste in Überkopfhöhe auf der Palette durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass das System selbst dann das Target tracken kann, wenn sich die Person am Seitenrand der Palette befindet. (siehe Abbildung 5.3)

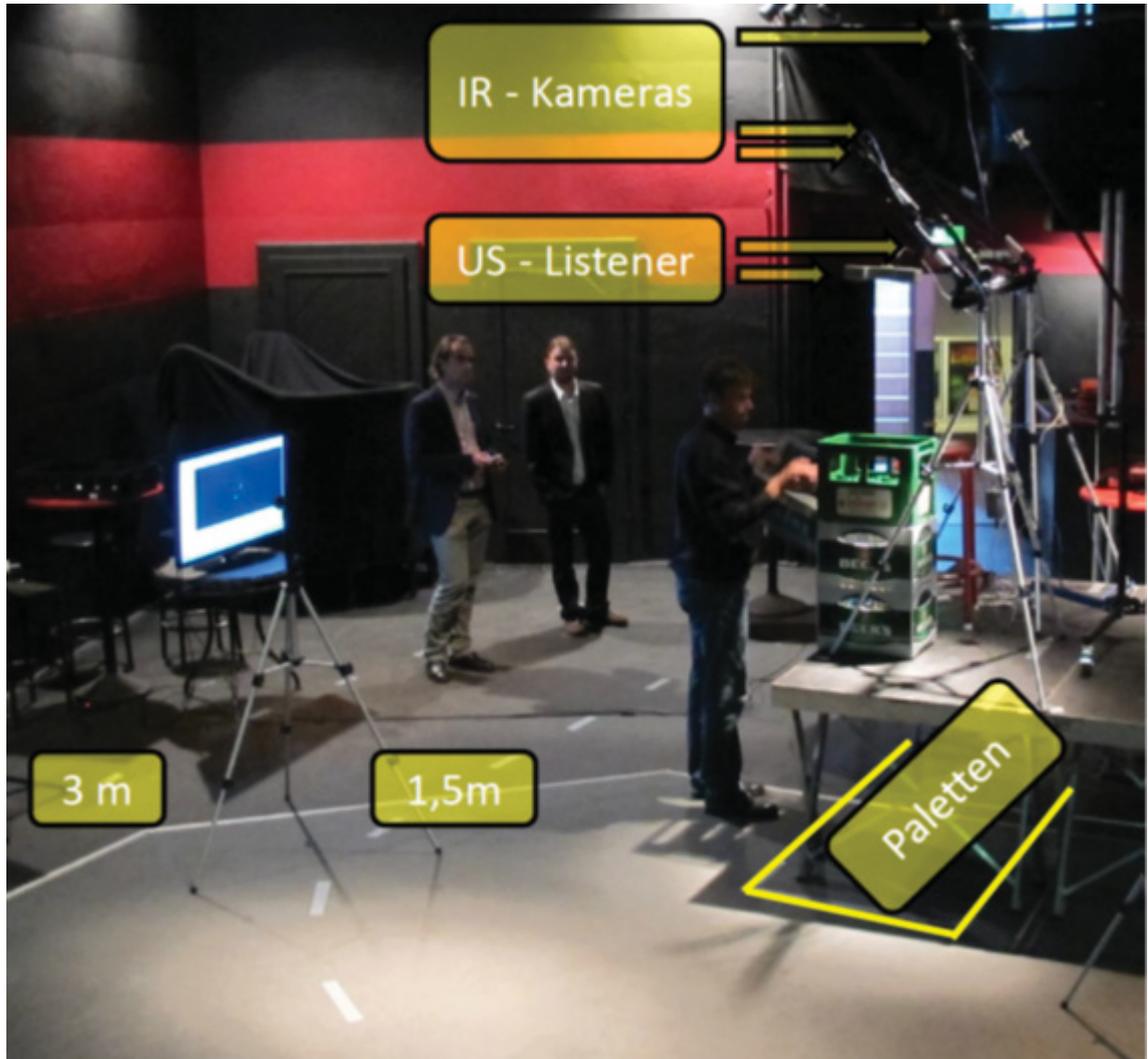


Abbildung 5.2: Testaufbei bei Nexonar mit IR und US Tracking



Abbildung 5.3: Testaufbau Nexonar - Ablage einer Kiste über Kopf

Test – Ultraschall Tracking

Beim Test der US-Lösung konnte ebenso beobachtet werden, dass das System die geforderten Messgenauigkeiten erfüllt. Wie bereits erwähnt entstehen jedoch Probleme, wenn 2 oder mehr Tracking Targets im selben Messbereich sind. Dieser Fall wurde getestet und es stellte sich heraus, dass die Trackingdaten unbrauchbar sind. Dieser Fall kann im realen Einsatz im Lager jedoch keinesfalls ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurde der Einsatz einer reinen Ultraschall Lösung ausgeschlossen.

Aktueller Stand Hybridlösung Infrarot / Ultraschall

Beim Testaufbau konnte jeweils nur Ultraschall oder Infrarot Tracking alleine getestet werden. Laut Aussagen von Nexonar sind sie jedoch bereits in der Lage die Messdaten von US-Listener und IR-Kamera gemeinsam auszuwerten.

5.2.3 Diskussion der Lösungsansätze

Im Anschluss an die Tests wurden die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten, die sich aus IR und US Tracking ergeben, diskutiert. Hierbei wurde das Hauptaugenmerk auf technische und funktionale Eigenschaften gelegt. Die nachfolgende Auflistung soll im Falle einer Zusammenarbeit als Grundlage für die Auswahl der passenden Lösungsvariante dienen.

Infrarot Outside–In

Bei dieser Lösung befinden sich die Infrarot Kameras am FFZ. Genauer gesagt am Rahmen über dem Palettenbereich. Um den gesamten Messbereich abdecken zu können sind zwischen 6 und 8 Kameras notwendig. Derzeit ist Nexonar in der Lage mit 3 geclusterten IR-Kameras bei einer Messrate von 130 Hz zu tracken. Für den von uns geforderten Anwendungsfall ist eine Messrate zwischen 30 und 60 Hz ausreichend. Diese Anforderung sollte laut den Aussagen von Nexonar auch mit 8 parallel arbeitenden IR-Kameras erfüllt werden können. Natürlich ist hierfür ein leistungsstarker Rechner notwendig. Bei dieser Konfiguration kann der Rechner am FFZ montiert werden und muss nicht an der Person mitgeführt werden, wodurch auch etwas größere, weil leistungstärkere, Computer eingesetzt werden können. Am Kopf der Person ist hierbei nur ein Tracking Target (aktive IR-Dioden) anzubringen. Da die Position des Trackingtargets relativ zum See-through Display bekannt sein muss, wäre es sinnvoll das Tracking Target fix über dem Display anzubringen. Ebenso muss folgendes Problem bedacht werden: Durch Temperaturänderungen kommt es zu Längenänderungen des Metallrahmens. Dadurch verändern sich die Abstände zwischen den einzelnen Kameras. Wie stark sich diese Effekte auf die Trackingqualität auswirken sollte anhand von praktischen Tests analysiert werden.

Infrarot Inside–Out

Bei dieser Lösung befinden sich zwei Infrarot Kameras am Kopf der Person. Eine Kamera blickt hierbei nach vorne, die zweite nach oben, um auch noch Targets im Blickbereich einer Kamera zu haben, wenn sich die Person über

die Palette beugt und den Blick nach unten richtet. Aktive Infrarot Targets sind am Rahmen über dem Palettenbereich anzubringen. Ebenso ist hier die temperaturabhängige Längenänderung des Metallrahmens zu bedenken. Die beiden Kameras am Kopf müssen fix zum Display kalibriert werden. Diese Aufgabe könnte sich als kritisch erweisen. Bei dieser Variante ist die Rechenleistung direkt an der Person gefordert.

Infrarot Mix (Inside–Out / Outside–In)

Bei diesem Ansatz befinden sich IR-Kameras und Targets sowohl am Kopf der Person als auch am Rahmen des FFZ. Vier Infrarot Kameras am Rahmen des FFZ decken in diesem Fall den Nahbereich (bis 1,5 m und über der Palette) ab. Zusätzlich befindet sich eine IR-Kamera am Kopf der Person, welche die Pose des Kopfes mithilfe von Targets am Rahmen des FFZ trackt. Gegenüber Variante *IR Inside - Out* hätte es den Vorteil, dass nur noch eine IR-Kamera am Kopf der Person angebracht werden muss.

Hybridsystem Infrarot Ultraschall

Dieser Ansatz basiert auf dem kombinierten Einsatz von Infrarot und Ultraschall Tracking nach dem Outside–In Prinzip. Das heißt sowohl IR-Kameras als auch US-Listener sind am Rahmen über dem Palettenbereich angebracht. Die US-Listener sind für das Tracking im Palettenbereich (wenn sich die Person über die Palette beugt) zuständig. Außerhalb soll das Tracking durch die IR-Kameras realisiert werden. Am Kopf der Person müsste sowohl ein IR als auch ein US Target angebracht werden. Es wäre jedoch durchaus möglich ein kombiniertes Target gemeinsam mit Nexonar zu entwickeln. Um das Problem mit den Interferenzen, das beim US Tracking auftritt zu umgehen, müssen die US Beacons immer dann abgeschaltet werden, wenn die Person den US – Messbereich verlässt. Ebenso müssen die Beacons wieder aktiviert werden, wenn die Person nah genug zur Palette kommt. Funktional bietet diese Lösung keine klar erkennbaren Vorteile gegenüber der reinen *IR Outside-In* Lösung. Sie weist jedoch höhere Komplexität auf, da zwei unterschiedliche Technologien miteinander kombiniert werden müssen.

Hybridlösung Infrarot oder Ultraschall / Optische Marker

Hierbei würde der Nahbereich (über der Palette und bis zu einem Abstand von 1,5 m) entweder durch 2 US-Listener oder 2-3 IR Kameras abgedeckt (am Rahmen auf dem FFZ) werden. Je nach gewählter Technologie ist das entsprechende Tracking Target am Kopf der Person anzubringen. Das Tracking außerhalb dieses Bereichs wird mithilfe der aktuell am Vision Client vorhandenen Kamera und optischen 2D Markern realisiert (wie bereits in KiSoft Vision vorhanden). Diese Marker sind am Rahmen über dem Palettenbereich angebracht. Dabei ist zu beachten, dass durch den Einsatz des optischen Marker Trackings deutlich geringere Genauigkeiten erzielt werden können. Als Vorteil ist zu erwähnen, dass die Hardware Anschaffungskosten im Vergleich zu den anderen Varianten geringer sind.

5.2.4 Fazit

Nach Betrachtung der unterschiedlichen Trackingvarianten (Zusammenfassung in Tabelle 5.1), die gemeinsam mit Nexonar erarbeitet wurden, stellte sich die Variante *IR Outside-In* als technisch stabilste heraus. Einerseits weist das IR Tracking eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig echtzeitfähiger Messrate auf. Andererseits treten im Gegensatz zur US Technologie keine Komplikationen auf, wenn sich mehrere Trackingtargets im selben Messbereich befinden. Der einzige Nachteil dieser Variante sind die relativ hohen Hardwarekosten, da zwischen sechs und acht IR Kameras am FFZ angebracht werden müssen. Es wäre jedoch anhand von Prototypen zu testen, welche Anzahl an Kameras ausreicht, um den Trackingbereich ausreichend abzudecken. Zusätzlich könnte die Anzahl der Kameras reduziert werden, wenn das Tracking im Fernbereich (zwischen 3 und 1,5 m Abstand zur Palette) durch Marker-Tracking realisiert wird. Aus heutiger Sicht wäre ein reines IR System jedoch die vielversprechendste, weil technisch stabilste, Variante um einen ersten Prototypen zu entwickeln.

	IR Outside In	IR Inside Out	Infrarot Mix	US/IR Hybrid	US/IR Marker
# Komponenten am FFZ	6-8 IR Kameras + IR Targets	IR-Targets	2-4 IR Kameras	2 US Listener + 4-6 IR Kameras	2-3 US Listener od. IR Kameras + Targets
# Komponenten an Person	1 IR-Target	2 IR-Kameras	1 IR-Kamera + 1 IR-Target	1 US-Target + 1 IR-Target	1 US od IR Target + optische Kamera
Vorteile	Stabile Verbindung zw. Target und Display Geringes Gewicht an Person Rechner am FFZ	Preis (nur 2 Kameras)	2 Kameras weniger im Vgl. zu IR-Outside-In	Hohe Genauigkeit über Zielpalette	Preis Marker Tracking bereits vorhanden
Nachteile	Preis - viele Kameras notwendig	Gewicht am Kopf der Person Verkabelung Rechenleistung an Person Kalibrierung Kameras zu Display notwendig	Hohe Komplexität Kombination der Trackingdaten von Person und FFZ	Komplexität Koppelung IR und US Targets	Niedrigere Genauigkeit im Marker Tracking Bereich
Potentiale	Navigation bis zum Regal möglich (in Kombination mit einem Stapler Tracking System) → keine Kamera am Vision Client nötig				

Tabelle 5.1: Vor- und Nachteile Lösungsvarianten Nexonar

Kapitel 6

Ablagekontrolle

In diesem Kapitel ist der praktische Teil dieser Arbeit beschrieben. Dabei wurde ein Prototyp für die Ablagekontrolle entwickelt. Dieser Teil kann als erster Schritt für eine Realisierung der in 5.1 beschriebenen Trackinglösung *NFT mit Tiefenbild* betrachtet werden. Es wurde bereits erwähnt, dass für die Realisierung des NFT Trackings drei prinzipielle Schritte umgesetzt werden müssen:

1. 3D - Rekonstruktion
2. Template Generierung
3. Tracking

Der erste Punkte - die 3D-Rekonstruktion - stellt den Bezug zur realen Umgebung, der Palette dar. Als Datenquelle wird eine Tiefenbildkamera verwendet. Bei der Entwicklung des Prototypen wurde ein *Microsoft Kinect for Windows* Sensor eingesetzt. Eine kurze Beschreibung dieses Sensors ist in Abschnitt 3.4.2 angeführt. Weitere Details sowie Daten bzgl. die Messqualität des Microsoft Kinect for Windows Sensors sind aus [AJL⁺12] zu entnehmen.

Die Durchführung der Ablagekontrolle basiert rein auf der Tiefeninformation, die von der Kinect geliefert werden. Diese enthält für jeden Pixel den Normalabstand zur Sensorebene in Millimeter. Die Abmessungen des Kartons, der als nächstes auf die Palette kommissioniert wird, sowie dessen

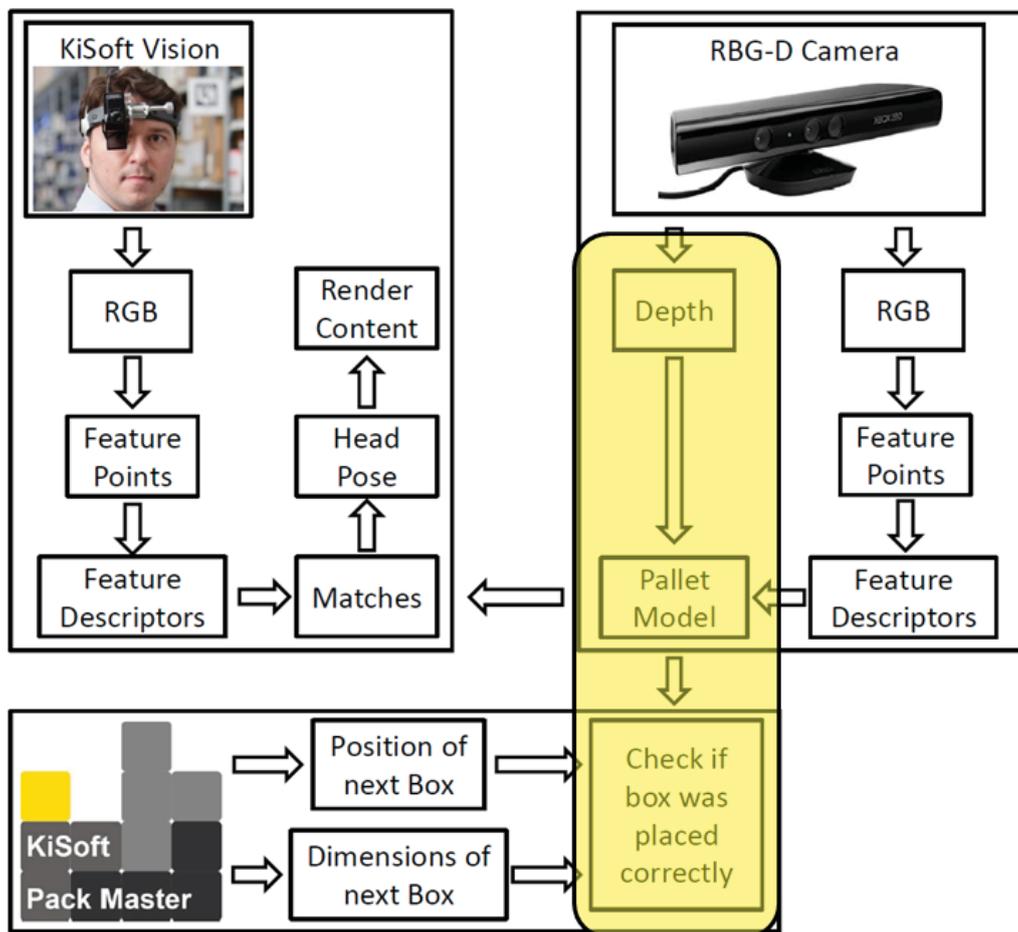


Abbildung 6.1: Technischer Umfang Ablagekontrolle - NFT Tracking

Ablageposition werden aus einem xml-File eingelesen, das vom *KiSoft Pack Master* zur Verfügung gestellt wird. Der Zusammenhang zwischen Ablagekontrolle und dem Trackingsystem *NFT mit Tiefenbild* ist in Abbildung 6.1 veranschaulicht. Darin ist zu erkennen, dass im Zuge der Prototypenentwicklung lediglich die geometrischen Informationen des Tiefenbildes verarbeitet werden, um eine einfache 3D-Rekonstruktion („Pallet Model“) zu erstellen.

Der Testaufbau ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Der Kinect Sensor wurde in einer Höhe von 2,2 m an einem Lagerregal angebracht. Mittig unter dem Kinect Sensor wurde eine Palette platziert.



Abbildung 6.2: Testaufbau der Ablagekontrolle

Die Anwendung für die Durchführung der Ablagekontrolle, die Software **Position Check** wurde in der Programmiersprache *C#* realisiert. Die Anwendung setzt sich aus zwei Teilen - **Kinect Control** und **Packbild Control** zusammen.

6.1 Kinect Control

Dieser Teil der Anwendung interagiert direkt mit dem Kinect Sensor. Ein Screenshot ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass auf der rechten Seite der Anwendung ein Video Stream des Tiefen- und des Farbbilds eingebunden ist. In der Fläche, die sich in der Mitte befindet kann wahlweise ein Farb- oder Tiefenbild eingefügt werden. Selektiert man einen Punkt auf diesem Bild, so werden zu diesem Punkt die x und y Pixel Koordinaten sowie die Tiefe (Abstand zur Sensorebene) des Punktes über dem Bild in Textboxen angezeigt. Des weiteren kann über den Button *Packbild Control* die Anwendung „Packbild Control“ gestartet werden. Der Button *Init Pallet* startet die Initialisierung der Palette (siehe Abschnitt 6.3).

6.2 Packbild Control

In diesem Teil der Anwendung wird die Schnittstelle zum *KiSoft Packmaster*, der die Packbild Daten über ein xml-File bereitstellt, hergestellt. Unter einem Packbild versteht man in diesem Zusammenhang die Soll- Beladungsinformationen für die Palette. Es beinhaltet sowohl die Reihenfolge in welcher die einzelnen Kartons auf die Palette kommissioniert werden, als auch deren Ablageposition und Dimensionen. Des weiteren werden die, von *Kinect Control* bereitgestellten Daten verarbeitet und ein Abgleich mit dem Soll-Packbild durchgeführt. Ein Screenshot der Anwendung ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Über den Button *Load Packbild* kann ein Packbild geladen werden. Das gesamte Packbild wird in weiß - transparent dargestellt. Der nächste Karton, der auf die Palette geladen werden soll, wird grün-gelblich markiert. Zudem kann selektiert werden, ob erkannte Kartons angezeigt werden sollen.

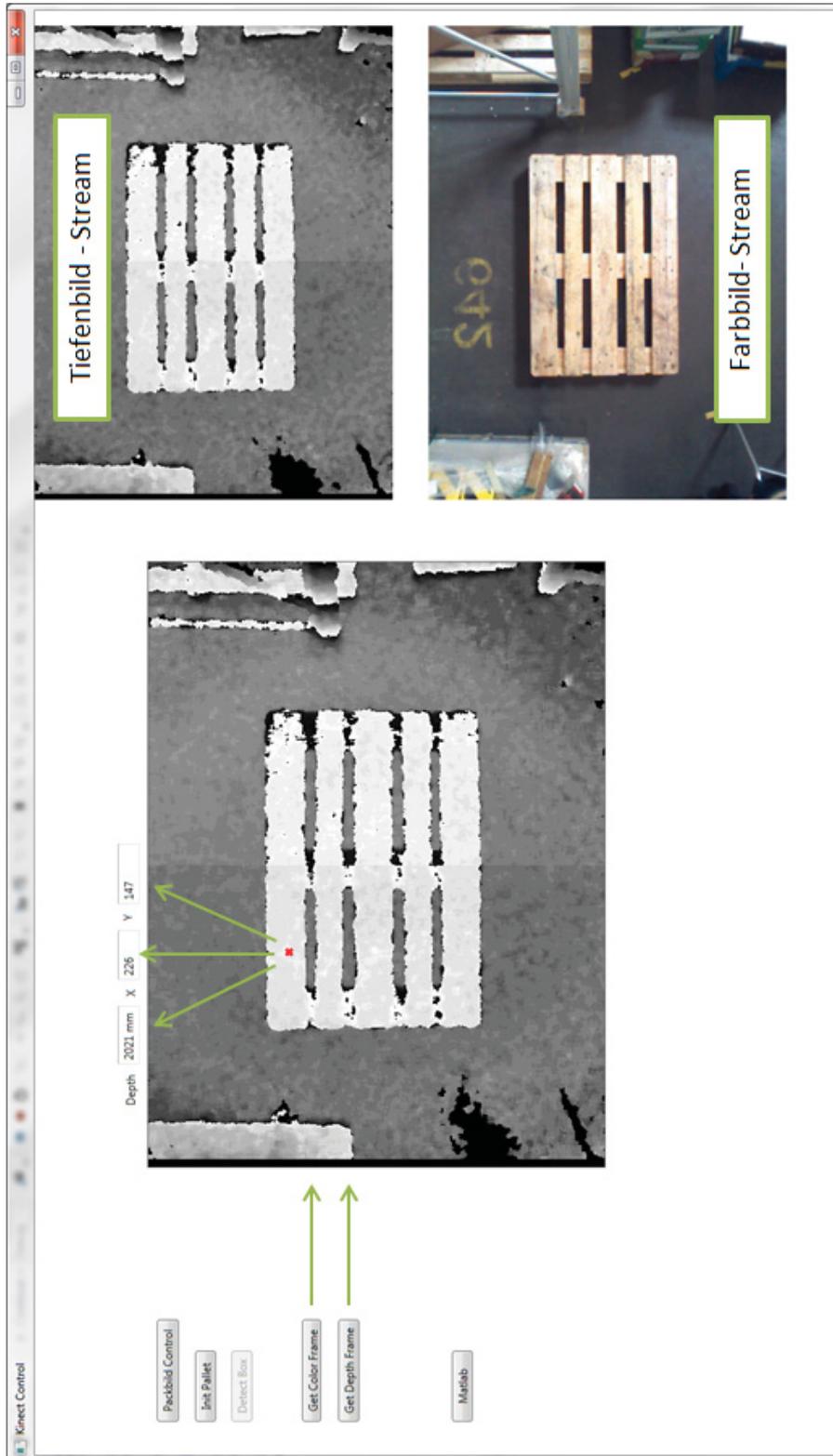


Abbildung 6.3: Screenshot von Kinect Control

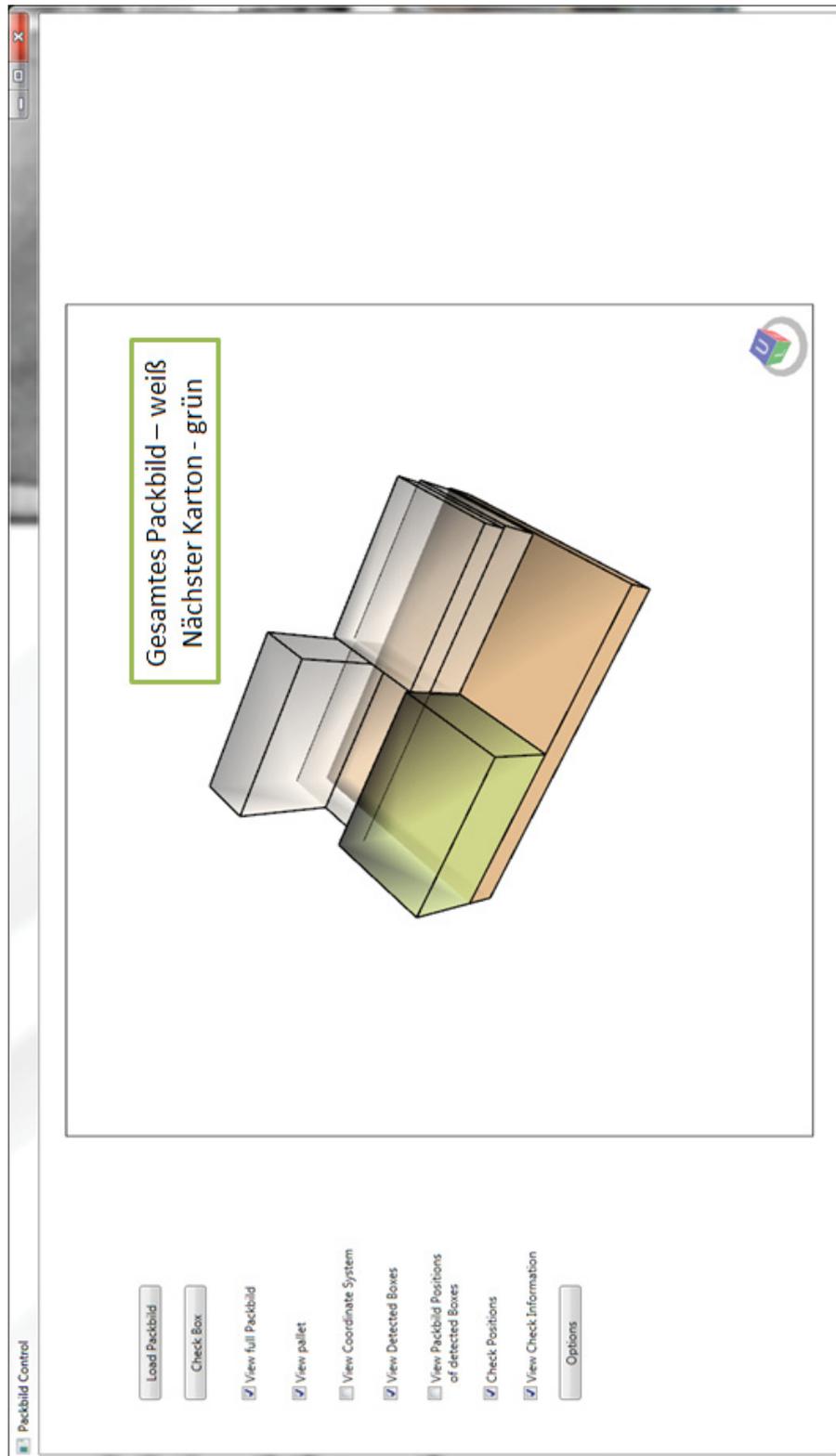


Abbildung 6.4: Screenshot von Packbild Control

6.3 Workflow - Programmablauf

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte beschrieben die vom Programm durchgeführt werden. Beim Starten des Programms wird zuerst die Anwendung *Kinect Control* geöffnet. Von hier aus kann *Packbild Control* gestartet werden. Bevor man mit der Ablagekontrolle beginnt, muss in *Packbild Control* das Packbild geladen werden. Zweitens muss die Palette initialisiert werden. Dazu verwendet der Benutzer ein Tiefenbild der Kinect, das in der Mitte von *Kinect Control* angezeigt wird. Mit einem Mausklick wird ein Punkt auf der Palette markiert. Dieser Punkt dient als Startpunkt für die Detektion der Palette (siehe Abbildung 6.5). Dabei wird der selbe Algorithmus wie bei der Detektion der Kartons verwendet (siehe Abschnitt 6.4). Die Eckpunkte des erkannten Rechtecks sowie die durchschnittliche Tiefe (Abstand zur Sensorebene) werden von *Kinect Control* an *Packbild Control* übergeben.

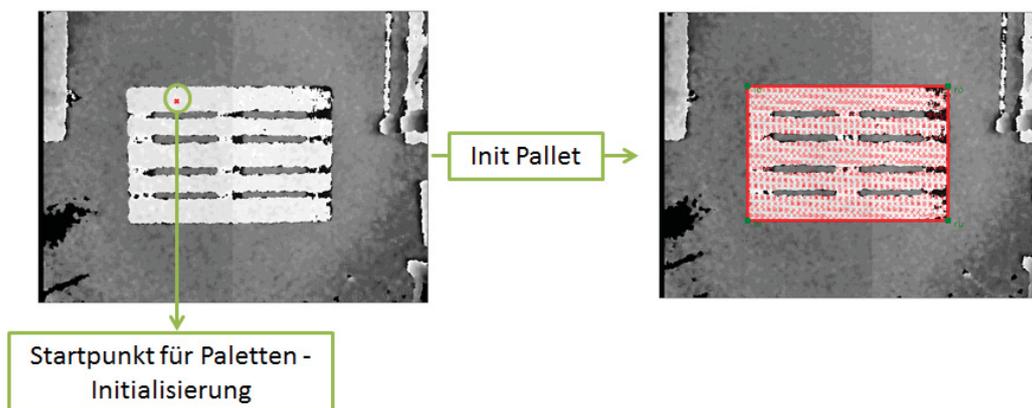


Abbildung 6.5: Init Pallet in Kinect Control

Da a priori bekannt ist, dass eine Palette die Abmessungen 1200 x 800 mm hat, kann die Information über die Pixel Koordinaten der Eckpunkte in weiterer Folge verwendet werden, um die Größe der erkannten Kartons zu berechnen. Nachdem diese vorbereitenden Schritte durchgeführt wurden, kann mit der Detektion und der anschließenden Ablagekontrolle der Kartons begonnen werden. Im Fenster von *Packbild Control* wird die Ablageposition des nächsten zu kommissionierenden Kartons angezeigt (siehe Abbildung

6.4). Nachdem der Karton abgelegt wurde, kann die Kontrolle des Kartons mittels des Buttons *Check Box* gestartet werden. Dabei werden jeweils folgende Schritte durchgeführt, die anschließend näher erklärt werden:

1. Berechnung des Startpunkts
2. Clustering
3. Berechnung des 3D-Kartons
4. Überprüfung des Kartons

6.3.1 Berechnung des Startpunkts

Um den Detektionsalgorithmus für die Durchführung des Clusterings durchführen zu können, muss ein Startpunkt $S(x, y)$ berechnet werden. Hierbei sind x und y Pixel-Koordinaten. Dazu wird der Soll-Mittelpunkt des aktuellen Kartons aus den Packbild-Daten berechnet. Diese Berechnung wird von Packbild Control durchgeführt. Der Startpunkt S wird anschließend an Kinect Control übergeben.

6.3.2 Clustering

Wie bereits beschrieben wird das Clustering von der Anwendung Kinect Control durchgeführt. Als Input wird von Packbild Control ein Startpunkt $S(x, y)$ zur Verfügung gestellt. Beim Clustering wird eine Menge A an Punkten gesucht, die auf einer ähnlichen Höhe wie der Startpunkt sowie in dessen Umgebung liegen. Der Algorithmus ist in Abschnitt 6.4 beschrieben. Nachdem die Clustermenge A erkannt wurde, wird das minimale umschließende Rechteck für diese Punkte berechnet. Gemeinsam mit den Eckpunkten dieses Rechtecks wird die durchschnittliche Tiefe der Clustermenge an Packbild Control übergeben. In Abbildung 6.6 ist ein Screenshot der *Kinect Control* zu sehen, nachdem die Fläche des zu erkennenden Kartons geclustert wurde. Das erkannte Rechteck ist rot markiert, der Startpunkt, von dem aus das Clustering begonnen wurde ist durch ein grünes Kreuz dargestellt.

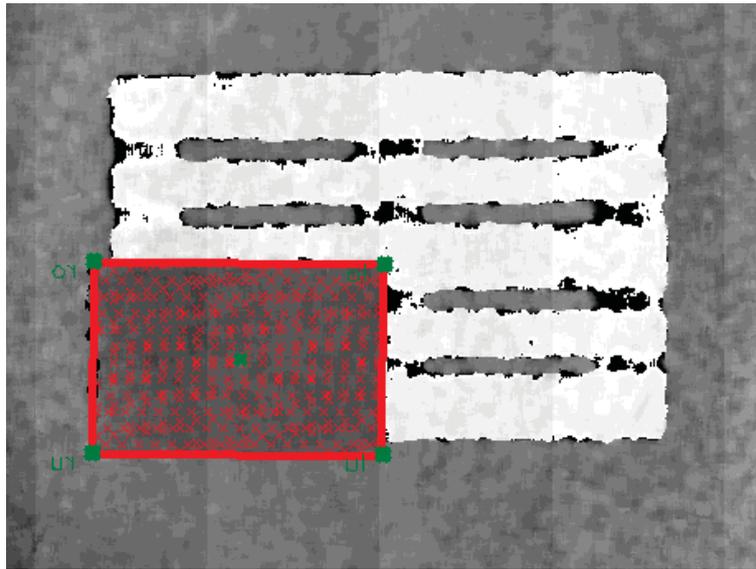


Abbildung 6.6: Kinect Control nach erfolgreicher Clustering

6.3.3 Berechnung des 3D-Kartons

Dieser Teil wird von Packbild Control durchgeführt. Als Input dienen die vier Eckpunkte des von Kinect Control erkannten Rechtecks sowie der durchschnittliche Abstand des Rechtecks zur Sensorebene. Die vier Eckpunkte des Rechtecks werden auf die Palettenebene projiziert, um einerseits die Koordinaten der Eckpunkte sowie dessen Abmessungen zu erhalten. Da sowohl der Abstand der Palette sowie der Abstand des erkannten Rechtecks zur Sensorebene bekannt sind, kann die Höhe des Quaders berechnet werden. An dieser Stelle muss noch überprüft werden, ob der aktuell erkannte Quader andere, bereits zuvor erkannte Quader schneidet. Dieser Fall tritt folgerichtig dann ein, wenn ein Karton auf einem andern abgelegt wird. Ist dies der Fall, so wird der aktuelle Karton bei jener Höhe abgeschnitten, wo er sich mit einem anderen schneidet.

6.3.4 Überprüfung des Kartons

Für den Abgleich zwischen Soll-Karton und erkanntem 3D-Karton werden alle vier Eckpunkte sowie die Höhen verglichen. Bei den Eckpunkten ist ein

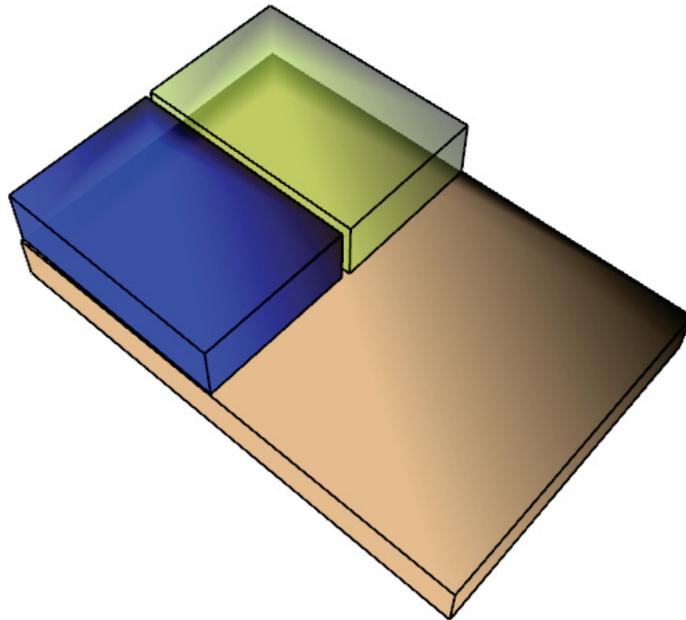


Abbildung 6.7: Packbild Control nach erfolgreicher Detektion eines Kartons

Schwellwert für die euklidische Distanz zwischen Soll- und Ist- Eckpunkt definiert worden. Ebenso gibt es einen Schwellwert für den Absolutbetrag der Differenz aus Soll- und Ist- Höhe. Für die Eckpunkte wurde die maximale Abweichung mit 3 cm festgelegt. Die Höhe darf maximal um 2 cm variieren. Diese Parameter können jedoch vom Benutzer in Packbild Control eingestellt werden (Button *Options*). In Abbildung 6.7 ist ein Screenshot von Packbild Control zu sehen, nachdem der Karton erkannt und für richtig abgelegt befunden wurde. Der richtig erkannte Karton wird hierbei in blau dargestellt, der grüne Karton zeigt den nächsten Karton, der auf die Palette gelegt werden soll. Die Abarbeitung eines Packbildes mit 11 Kartons ist in Anhang A dokumentiert. Wird ein Karton als falsch abgelegt bewertet, so wird er dem Benutzer in rot dargestellt.

6.4 Detektionsalgorithmus

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das aktuelle System in der Lage ist, ebene Flächen zu erkennen. Das heißt, es können bloß Kartons erkannt werden, die an ihrer Oberfläche geschlossen sind. Der Algorithmus basiert darauf, dass das Tiefenbild als Graph $G(V, E)$ modelliert wird. Um mit der Detektion eines Kartons (= „ebene“ Fläche im Tiefenbild) zu beginnen, muss zuerst ein Startpunkt ausgewählt werden. Dieser wird von Packbild Control geliefert. Dieser Startpunkt S dient gemeinsam mit dem Graphen $G(V, E)$, der das Tiefenbild modelliert, als Input für den Detektionsalgorithmus. Jeder Knoten $v \in V$ besitzt eine x und y Pixel Koordinate sowie eine z Koordinate, die den Abstand zur Sensorebene in mm beschreibt. Ausgehend vom Startpunkt beginnt der Algorithmus mit dem Clustering. Der Pseudocode ist in Algorithmus 1 zu sehen.

Algorithmus 1 : Detektionsalgorithmus

Data :

S ... Start Knoten

A ... Clustermenge, für alle Knoten in A wurden bereits die nearNodes gesucht

B ... Knoten die neu in A aufgenommen werden, nearNodes noch nicht gesucht

$B = \{S\};$

$maxDist;$

while B not empty **do**

$nextNode = B.removeFirst();$

$B.add(findNearNodes(nextNode));$

$A.add(nextNode);$

end

$findNearNodes(nextNode)$

Liefert Menge jener Knoten zurück, die maximal $maxDist$ von $nextNode$ entfernt sind und weder in Menge A oder B enthalten sind.

Dabei wird der euklidische Abstand verwendet.

Result : A

Als Wert für $maxDist$ wurde 2 cm verwendet. Der Parameter kann vom Benutzer geändert werden. Nachdem die Clustermenge A berechnet wurde,

wird das minimale umschließende Rechteck aller Punkte $\in A$ berechnet und gemeinsam mit deren durchschnittlichem Tiefe t (Abstand zur Sensorebene) an Packbild Control übergeben. In Kinect Control werden die geclusterten Punkte gemeinsam mit der Tiefeninformation t gespeichert. Diese Information dient in weiterer Folge dazu, bereits erkannte Fläche kein zweites mal beim Clustering zu verwenden. So ist es möglich zwei nebeneinander liegende Kartons selber Höhe, die nacheinander auf die Palette gepackt wurden auch als zwei einzelne Kartons zu erkennen. Würden die geclusterten Knoten nicht gespeichert werden, so würde der Algorithmus beim zweiten Durchlauf die beiden Kartons als eine große Fläche erkennen.

6.5 Messgenauigkeiten

Um eine gute Wahl der Schwellwerte für die Überprüfung der Kartons treffen zu können wurden Messungen anhand von eingemessenen Kartons durchgeführt. Dazu wurde ein Karton mit den Abmessungen 595 x 390 x 155 mm (Länge, Breite, Höhe) an zwei definierten Positionen jeweils 50 mal vermessen. Der Karton befand sich stets in der linken vorderen Ecke der Palette (0,0). Einmal wurde die Messung auf Paletteniveau durchgeführt (Höhe 0) und einmal bei einer Höhe von 81 cm. Die beiden Testaufbauten sind in den Abbildungen 6.8 und 6.9 zu sehen.



Abbildung 6.8: Aufbau - Karton bei Koordinaten (0,0,0)

Das Koordinatensystem sowie die Positionen der einzelnen Eckpunkte P1 bis P4 sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der linken vorderen Ecke der Palette. P1 ist jener Punkt mit der geringsten x und y Koordinate. Von hier weg werden die Punkte gegen den Uhrzeigersinn nummeriert.



Abbildung 6.9: Aufbau - Karton bei Koordinaten $(0,0,810)$

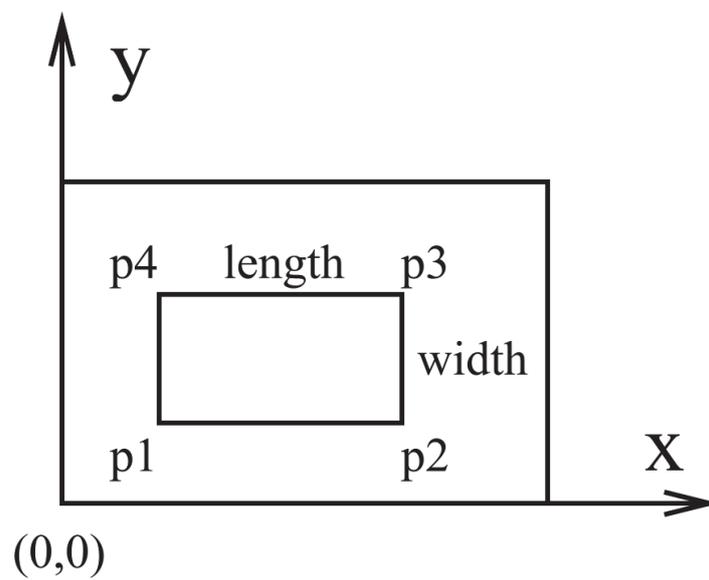


Abbildung 6.10: Koordinatensystem der Palette

6.5.1 Karton bei (0,0,0)

In Tabelle 6.1 sind pro Eckpunkt die im Mittel gemessene x und y Koordinate sowie die Standardabweichung und die Varianz angegeben. Zusätzlich befinden sich die Messwerte für Länge, Breite und Höhe in dieser Tabelle. Alle Angaben sind in Millimeter.

Koordinate	Sollwert	Mittelwert	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Varianz
$P1_x$	0	4,00	4,00	3,12	9,71
$P1_y$	0	-2,63	-2,63	3,37	11,38
$P2_x$	595	596,61	1,61	2,49	6,20
$P2_y$	0	-1,96	-1,96	2,49	3,88
$P3_x$	595	596,33	1,33	2,62	5,12
$P3_y$	390	389,14	-0,86	4,05	16,37
$P4_x$	0	3,63	3,63	2,33	5,42
$P4_y$	390	388,73	-1,67	3,46	11,99
Länge	595	592,62	-2,38	2,38	5,67
Breite	390	391,37	1,37	3,01	9,09
Höhe	155	151,49	-3,51	0,50	0,24

Tabelle 6.1: Messabweichungen der Koordinaten - Karton bei (0,0,0)

Zusätzlich wurde pro Messung die euklidische Distanz zwischen gemessenem Eckpunkt und Soll Eckpunkt berechnet. Die mittleren Abweichungen dieser Messungen samt Standardabweichung und Varianz sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. (Angaben wiederum in mm)

Eckpunkt	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Varianz
$P1$	5,32	3,62	13,10
$P2$	3,68	1,65	2,74
$P3$	4,34	2,16	4,66
$P4$	5,1	2,23	4,97

Tabelle 6.2: Messabweichungen der Eckpunkte - Karton bei (0,0,0)

6.5.2 Karton bei (0,0,810)

In Tabelle 6.3 sind pro Eckpunkt die im Mittel gemessene x und y Koordinate sowie die Standardabweichung und die Varianz angegeben. Zusätzlich befinden sich die Messwerte für Länge, Breite und Höhe in dieser Tabelle. Alle Angaben sind in Millimeter.

Koordinate	Sollwert	Mittelwert	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Varianz
$P1_x$	0	-4,19	-4,19	2,37	5,63
$P1_y$	0	-2,59	-2,59	1,63	2,68
$P2_x$	595	598,57	3,57	1,41	1,98
$P2_y$	0	-3,20	-3,20	1,98	3,94
$P3_x$	595	599,32	4,32	2,16	4,65
$P3_y$	390	386,37	-3,63	3,49	12,15
$P4_x$	0	-3,89	-3,89	1,80	3,23
$P4_y$	390	386,83	-3,17	3,29	10,83
Länge	595	602,76	7,76	2,33	5,44
Breite	390	389,41	0,59	3,19	0,46
Höhe	155	161,30	6,30	0,46	0,21

Tabelle 6.3: Messabweichungen der Koordinaten - Karton bei (0,0,810)

Zusätzlich wurde pro Messung die euklidische Distanz zwischen gemessenem Eckpunkt und Soll Eckpunkt berechnet. Die mittleren Abweichungen dieser Messungen samt Standardabweichung und Varianz sind in Tabelle 6.4 aufgelistet. (Angaben wiederum in mm)

Eckpunkt	Mittlere Abweichung	Standardabweichung	Varianz
$P1$	5,37	2,00	4,02
$P2$	5,07	1,68	2,84
$P3$	6,37	2,55	6,49
$P4$	6,02	2,07	4,28

Tabelle 6.4: Messabweichungen der Eckpunkte - Karton bei (0,0,810)

Es ist ersichtlich, dass die Abweichung zwischen Ist und Sollwerten beim zweiten Messdurchlauf (0,0,810) etwas größer sind als bei der Messung die auf Palettenniveau durchgeführt wurde. Ein möglicher Grund dafür kann sein, dass sich Höhenmessfehler des Kinect Sensors bei der Projektion der Eckpunkte auf die Palettenebene in diesem Fall stärker auswirken. Man kann jedoch festhalten, dass auch bei einer Kartonhöhe von 81 cm die Messungen der Eckpunkte im Mittel zwischen 5 und 6 mm von der Sollposition abweichen.

Kapitel 7

Conclusio

Ziel dieser Masterarbeit (vgl. Kapitel 1) war es, ein Trackingsystem für *Ki-Soft Vision* auszuwählen, das es ermöglicht die Ablageposition von Kartons auf der Zielpalette zu Augmentieren. Zudem sollte ein Prototyp für die Realisierung einer Ablagekontrolle entwickelt werden. Beide Ziele konnten erreicht werden.

Aufbauend auf einem umfassenden Überblick über potentiell einsetzbare Trackingtechnologien (siehe Kapitel 3) wurden konkrete Trackingvarianten in Kooperation mit unterschiedlichen Anbietern ausgearbeitet und evaluiert (siehe Kapitel 4). Dabei wurde vor allem darauf Wert gelegt, dass alle technisch machbaren Varianten berücksichtigt werden und keine Technologie auf Grund von unbegründeten Annahmen ausgeschlossen wurde. Die einzelnen Lösungsszenarien wurden mittels des *Analytical Hierarchy Process* evaluiert. Diese Methodik wurde ebenso für die Erstellung (Definition der Kriteriengewichte) des Kriterienkataloges verwendet, um eine objektive Bewertung der einzelnen Alternativen gewährleisten zu können. Als Resultat der Evaluierung wurden die zwei vielversprechendsten Lösungsansätze - *Natural Feature Tracking (NFT) mit Tiefenbild* und *Infrarot (IR)-Tracking* der Firma soft2tec (Nexonar) - identifiziert. Weitere Details zu diesen beiden Lösungen sind in Kapitel 5 angeführt und sollen als Grundlage für eine mögliche Umsetzung dienen.

Wie bereits einleitend erwähnt wurde im Zuge dieser Masterarbeit ein Prototyp namens *Position Check* für die Ablagekontrolle entwickelt. Für die Umsetzung wurde ein *Microsoft Kinect for Windows* Sensor verwendet. Die Funktionalität der Ablagekontrolle steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Anzeige der Ablageposition, da sie es ermöglicht, die Ablage des Kartons zu verifizieren. Des Weiterem steht dieser Prototyp (siehe Kapitel 6) in unmittelbarem Zusammenhang mit der Trackinglösung *NFT mit Tiefenbild*. Die hier durchgeführte 3D-Rekonstruktion der Palette (inkl. Beladung) mit einer Tiefenbildkamera stellt den ersten Schritt bei der Entwicklung dieses Trackingsystems dar.

Das Programm „Position Check“ ist in der Lage Boxen mit geschlossener Oberfläche, die auf die Palette gelegt werden, zu erkennen. Die Soll-Daten bzgl. Ablagepositionen und Dimensionen der zu kommissionierenden Boxen werden vom *KiSoft Pack Master* zur Verfügung gestellt. Nachdem ein Karton erkannt wurde, wird ein Abgleich zwischen Ist- und Soll-Daten durchgeführt. Im Zuge dieser Umsetzung konnte gezeigt werden, dass bereits mit vergleichsweise geringem Aufwand für Hardware eine Ablagekontrolle realisiert werden kann.

Literaturverzeichnis

- [ABB⁺01] AZUMA, Ronald ; BAILLOT, Yohan ; BEHRINGER, Reinhold ; FEINER, Steven ; JULIER, Simon ; MACINYRE, Blair: Recent advances in augmented reality. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 21 (2001), Nr. 6, S. 34–47
- [AJL⁺12] ANDERSEN, M. R. ; JENSEN, T. ; LISOUSKI, P. ; MORTENSEN, A. K. ; HANSEN, M. K. ; GREGERSEN, T. ; AHRENDT, P. ; AARHUS UNIVERSITY (Hrsg.): *Kinect Depth Sensor Evaluation for Computer Vision Applications: Electrical and Computer Engineering*. Februar 2012 (Technical report ECE-TR-6)
- [Azu97] AZUMA, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 4 (1997), Nr. 6, S. 355–385
- [Che10] CHEOK, Adrian D.: Human Pacman: A Mobile Augmented Reality Entertainment System Based on Physical, Social, and Ubiquitous Computing. In: *Art and Technology of Entertainment Computing and Communication*. Springer London, 2010, S. 19–57
- [Dep10] DEPENTHAL, Claudia: Path Tracking with iGPS. In: MAUTZ, R. (Hrsg.) ; KUNZ, M. (Hrsg.) ; INGENSAND, H. (Hrsg.): *Path Tracking with iGPS*, 2010 (Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation)

- [Gab] SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Virtual Reality, online im Internet*:. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/75128/virtual-reality-v7.html>
- [HSB11] HOMPEL, Michael t. ; SADOWSKY, Volker ; BECK, Maria: *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*(4. Auflage). Springer, 2011
- [Kau04] KAUFMANN, Hannes: *Geometry Education with Augmented Reality*. Wien, TU Wien, Diss., 2004
- [Kle06] KLEIN, Georg: *Visual Tracking for Augmented Reality*. Cambridge, University of Cambridge, Diss., 2006
- [Kra12] KRAUSE, Lars-Olof: *Nutzung von Augmented Reality Technologien auf Smartphonesystemen im Bereich Marketing*. Gießen, Technische Hochschule Mittelhessen, Masterarbeit, 2012
- [Mau09] MAUTZ, Rainer: Overview of current Indoor Positioning Systems. In: *Geodesy and Cartography* 35 (2009), Nr. 1, S. 18–22
- [Mau12] MAUTZ, Rainer: *Indoor Positioning Technologies*. Zürich, ETH Zürich, Habilitation, 2012
- [MH12] MEIXNER, Oliver ; HAAS, Rainer: *Wissensmanagement und Entscheidungstheorie: Theorien, Methoden, Anwendungen und Fallbeispiele* (2. Auflage). Wien : Facultas Verlags- und Buchhandels AG, 2012
- [MTUK94] MILGRAM, Paul ; TAKEMURA, Haruo ; UTSUMI, Akira ; KISHINO, Fumio: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: DAS, Hari (Hrsg.): *Telemanipulator and Telepresence Technologies* Bd. 2351, 1994, S. 282–292

- [MWSB09] MULLONI, Alessandro ; WAGNER, Daniel ; SCHMALSTIEG, Peter ; BARAKONYI, Istvan: Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones. In: *Pervasive Computing* 8 (2009), S. 22–31
- [Pri05] PRIYANTHA, Nissanka B.: *The Cricket Indoor Location System*. Boston, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 2005
- [Pro11] PRODROMOU, Dimitrios: *RobotaS - Entwicklung eines mobilen Roboters zum Kleinwaren Transport*. Wien, FH Technikum Wien, Masterarbeit, 2011
- [RBW05] REGENBRECHT, Holger ; BARATOFF, Gregory ; WILKE, Wilhelm: Augmented Reality Projects in Automotive and Aerospace Industry. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 25 (2005), Nr. 6
- [RW07] REIF, Rupert ; WALCH, Dennis: Augmented & Virtual Reality Applications in the Field of Logistics. In: *4th INTUITION International Conference on Virtual Reality and Virtual Environments proceedings*. Athen, 2007
- [Saa90] SAATY, Thomas L.: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operations Research* (1990), Nr. 48, S. 9–26
- [Sch08] SCHILLING, Thomas: *Augmented Reality in der Produktentstehung*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2008
- [Sch12] SCHMUTZER, Ludwig: *Gestenbasierte Steuerung von interaktiven Umgebungen mithilfe der Microsoft Kinect*. Dresden, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2012
- [Sut06] SUTHAU, Tim: *Positionsgenaue Einblendung räumlicher Informationen in einem See Through Head Mounted Display für die Medizin am Beispiel der Leberchirurgie*. Berlin, Technische Universität Berlin, Diss., 2006

- [TM10] TILCH, Sebastian ; MAUTZ, Rainer: Development of a new laser-based optical indoor positioning system. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (2010), Nr. 5
- [TM11] TILCH, Sebastian ; MAUTZ, Rainer: CLIPS Proceedings. In: *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2011
- [Ver88] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 2861 - Kenngrößen für Industrieroboter Blatt 1-3*. Düsseldorf, Juni 1988
- [Ver94] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 3590 Blatt 1 Kommissioniersysteme Grundlagen*. Berlin, April 1994
- [Ver07] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI Richtlinie 4490 Operative Logistikkennzahlen von Wareneingang bis Versand*. Berlin, Mai 2007
- [WBV⁺01] WELCH, Greg ; BISHOP, Gary ; VICCI, Leandra ; BRUMBACK, Stephen ; KELLER, Kurtis ; COLUCCI, D'nardo: High-Performance Wide-Area Optical Tracking: The HiBall Tracking System. In: *Presence* 10 (2001), Nr. 1, S. 1–21
- [Wes12] WESTERFIELD, Giles: *Intelligent Augmented Reality Training for Assembly and Maintenance*. Canterbury, University of Canterbury, Masterarbeit, 2012
- [WJH97] WARD, Andy. ; JONES, Alan. ; HOPPER, Andy.: A new location technique for the active office. In: *IEEE Personal Communications* 4 (1997), Nr. 5, S. 42–47
- [WNDW11] WINSTON, Yii ; NALIKA, Damayanthi ; DRUMMOND, Tom ; WAI, Li H.: Visual Localisation of a Robot with an external RGBD Sensor. In: *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation*. Monash University, Melbourne, 2011

- [ZP06] ZELEWSKI, Stephan ; PETERS, Malte L.: Multikriterielle Wirtschaftlichkeitsanalysen mithilfe des Analytic Hierarchy Process. In: *Das Wirtschaftsstudium: wisu* 35 (2006), Nr. 8/9, S. 1069–1075

Anhang A

Abarbeitung eines Packbildes

In diesem Anhang befinden sich Abbildungen, die die Abarbeitung eines Packbildes mit Hilfe der Software *Position Check* dokumentieren. Insgesamt besteht das Packbild aus 11 Boxen, die nacheinander auf die Palette gelegt werden. Pro Ablage sind ein Bild der Palette sowie ein Screenshot von *Kinect Control* und *Packbild Control* zu sehen.

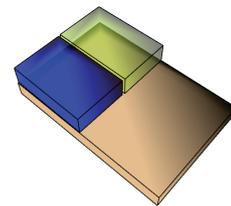
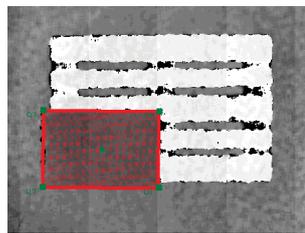


Abbildung A.1: Ablage Box 1

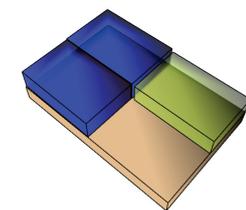
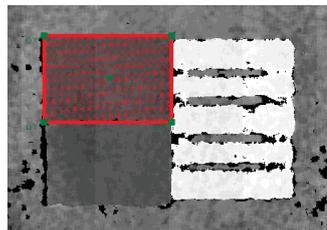


Abbildung A.2: Ablage Box 2

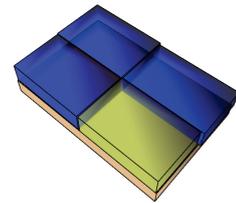
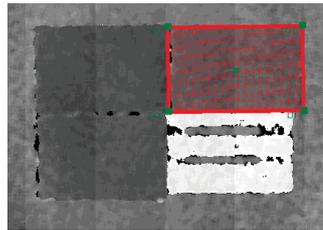


Abbildung A.3: Ablage Box 3

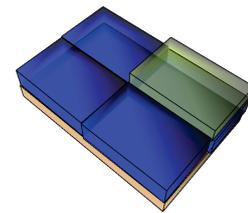
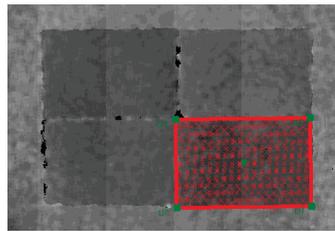


Abbildung A.4: Ablage Box 4

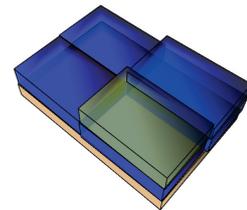
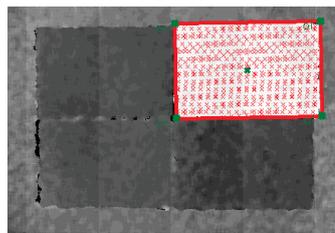


Abbildung A.5: Ablage Box 5

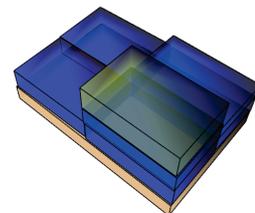
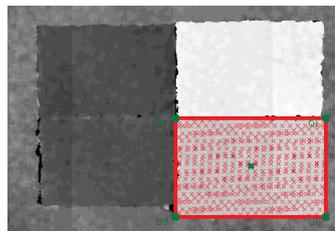


Abbildung A.6: Ablage Box 6

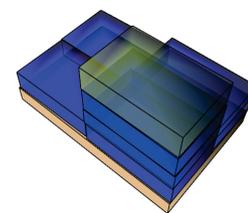
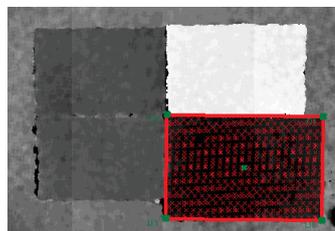


Abbildung A.7: Ablage Box 7

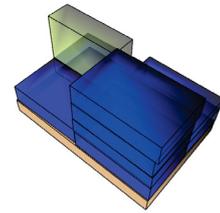
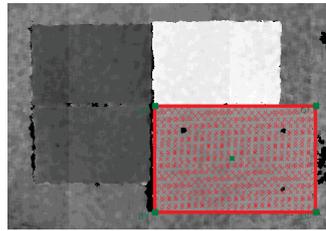


Abbildung A.8: Ablage Box 8

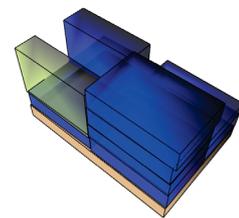
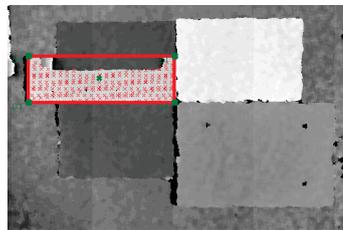


Abbildung A.9: Ablage Box 9

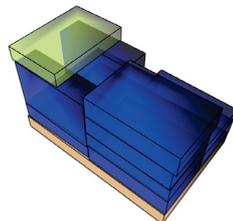
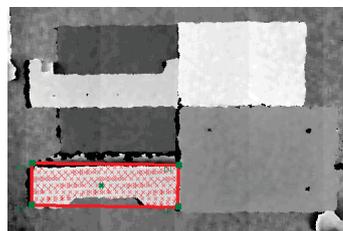


Abbildung A.10: Ablage Box 10

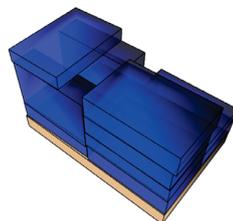
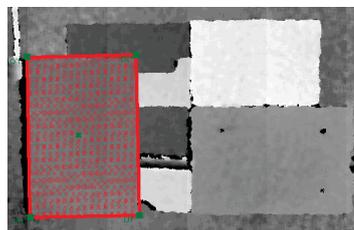


Abbildung A.11: Ablage Box 11