

Navigation mit mobilen Augmented Reality Systemen im Gelände

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Guido Martin Staub

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2006

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil Dr. h. c. Hans-Peter Bähr

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Dillmann

Karlsruhe 2006

Kurzfassung

Die Navigation im Gelände stellt in verschiedensten Anwendungen eine besondere Herausforderung dar. Durch immer weitere technische Innovationen stehen unzählige Sensoren und Methoden zur Verfügung, die zur Bewältigung dieses Problems eingesetzt werden können. Jedoch legt bereits die Art der Anwendung, der Raum, in dem navigiert werden soll, und die zu verwendende Trägerplattform fest, welche Sensoren überhaupt in diesem Zusammenhang nützlich sind. Motiviert wurde diese Arbeit durch eine Aufgabenstellung aus dem geowissenschaftlichen Bereich, bei der virtuelle Objekte mit der Umwelt in Echtzeit überlagert werden sollten. Damit standen Raum und Anwendung bereits fest. Da im Bereich der Geowissenschaften immer noch der Mensch die täglichen Arbeiten im Gelände durchführt, war somit auch die Art der Plattform definiert.

Augmented Reality Systeme bieten die Möglichkeit, künstliche Objekte in Echtzeit in das Gesichtsfeld eines Anwenders einzuspiegeln. Diese werden im optimalen Fall so mit der Umgebung überlagert, dass der Informationsgehalt der Szene steigt. Ein Nutzer kann auf diese Weise Entscheidungen treffen oder Prognosen vornehmen, die ohne den Einsatz eines solchen Systems nicht möglich gewesen wären. Damit nun aber der räumliche Bezug zwischen den virtuellen Objekten und der Umgebung korrekt hergestellt werden kann, ist es notwendig, dass die Position des Anwenders so genau wie möglich bestimmt ist. Nur so können die künstlichen Objekte, entsprechend ihrer internen Beschreibung, richtig bezüglich Lage und Orientierung dargestellt werden.

Ausgehend von dieser Forderung wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der sich zum einen des Problems der Positionsbestimmung im Gelände annimmt und zum anderen bei der Navigation unterstützt.

Multisensordlösungen bieten für die Bestimmung der Position eine Möglichkeit, um unterschiedlichen äußeren Gegebenheiten gerecht zu werden. Sie erlauben einen Einsatz sowohl auf freiem Feld als auch in dicht bebauten Stadtgebieten. Aus diesem Grund wurde ein System, bestehend aus einem Empfänger zur Satellitennavigation, inertialer Messeinheit und Videokamera, entworfen und realisiert. Die drei Komponenten unterstützen und ergänzen sich gegenseitig in idealerweise bei der Positionsbestimmung.

Die visuelle Navigation eines Anwenders hingegen geschieht zum großen Teil durch Augmented Reality. Hierdurch ergeben sich völlig neue Möglichkeiten bei der Beschreibung des momentanen Standortes und der Umgebung. Es können Informationen in Echtzeit mit der Umwelt überlagert werden, was zur sicheren und zielgerichteten Fortbewegung im Gelände beiträgt.

Die implementierte Lösung erweitert daher gewöhnliche Augmented Reality Systeme über reine Visualisierungswerkzeuge hinaus. Es ist ein System entstanden, welches den Nutzer zusätzlich bei der Navigation unterstützt. Damit wird die Einsetzbarkeit eines solchen Systems besonders durch die entwickelten Navigationsroutinen erheblich gesteigert. Der Einfluss der Umwelt auf die Positionsbestimmung wird aufgrund der implementierten Multisensordlösung reduziert. Durch die Tatsache, dass der implementierte Ansatz rein auf systemrelevanten Komponenten basiert, ist das System in seiner Gesamtheit kompakt gestaltet und es besteht die Möglichkeit, die visuellen Informationen bei Bedarf durch anwendungsspezifische Ausgaben auf einfache Art und Weise zu ergänzen.

Abstract

Navigation in an outdoor environment is a special challenge in many applications. Due to more and more technical innovations a great amount of sensors and methods is available to solve this problem. However the type of application, its location where the user plans to navigate through and the selected platform determine which sensors are useful. This work was motivated by a task within a geoscientific context where the environment should be superimposed in real-time by virtual objects. This already determined the setting and application. Fieldwork in geoscience is typically still accomplished by human beings thus defining the platform as well.

Augmented Reality Systems offer the possibility to superimpose virtual objects in real-time within the user's field of view. These virtual objects are supposed to increase the information content of the scene and enable decisions and forecasts that would not be possible without such a system. In order to spatially relate the virtual objects to the underlying environment it is essential to determine the user's position as accurate as possible thereby ensuring the correct visualisation of the artificial objects concerning location and orientation.

Considering this demand a novel approach was developed to solve positioning problems in the terrain and to support a user while navigating.

Multi-sensor based solutions provide a possibility to cope with different outdoor conditions that influence positional accuracy. They can be applied in the terrain as well as in urban „canyons“. Therefore a system consisting of a receiver acquiring satellite signals, an inertial measurement unit and a video-camera was designed and realised. The three components optimally assist and supplement each other in determination of the user's position.

In order to visually guide the user Augmented Reality is applied. This innovation offers completely new ways to describe the current position and environment. Real-time superimposition of the environment with additional information can contribute to a safe and precise locomotion in the field.

The implemented solution enhances typical Augmented Reality Systems from pure visualisation tools to systems that aid users during their navigational task. Therefore, the newly developed navigational routines considerably expand the field of application of such a system. The influence of environmental conditions on the positioning gets reduced by the implemented multi-sensor solution. Using only required system-components the prototype is still held compact and it offers the possibility to add any application specific visual output.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Projekthintergrund	3
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Gliederung der Arbeit	5
2 Navigation	6
2.1 Begriffserklärung	6
2.2 Qualitätsaspekte bei Navigationslösungen	7
2.3 Historischer Hintergrund	8
2.4 Verfahren der Gegenwart	9
2.4.1 Weiterentwicklungen historischer Techniken	10
2.4.2 Funknavigation	11
2.4.3 Satellitennavigation	11
2.4.4 Trägheitsnavigation	14
2.4.5 Kamerabasierte Navigation	14
2.4.6 Hybridnavigation	15
2.4.7 Stand der Technik bei der Fußgängernavigation	16

2.5	Trend	19
2.5.1	Einfluss auf die Fußgängernavigation	21
3	Informationsgewinnung aus Bildern	22
3.1	Definitionen	22
3.2	Digitale Bildverarbeitung	23
3.2.1	Bildverbesserung	24
3.2.2	Verfahren zur Merkmalsextraktion	32
3.3	Bildvergleich („Matching“)	35
4	Neuer Ansatz zur Hybridnavigation	37
4.1	Das System im Überblick	37
4.1.1	Abgrenzung zu anderen AR Systemen	37
4.2	Die GPS-Einheit	38
4.2.1	Auslesen der Daten in Echtzeit	38
4.2.2	Notwendige Transformationen	40
4.2.3	Auslesefrequenz der verwendbaren Nachrichtensätze	42
4.2.4	Speichern der ausgelesenen Datensätze	43
4.2.5	Die GPS Methode im Überblick	44
4.2.6	Grenzen des Systems	44
4.3	Die IMU	46
4.3.1	Orientierung	47
4.3.2	Beschleunigung	47
4.3.3	Auswertung der Messungen	48
4.3.4	Ergebnis der Auswertung	53
4.4	Die Videokamera	54
4.4.1	Softwareseitige Realisierung	55
4.4.2	Berechnung von Objektkoordinaten in einem übergeordneten System	56
4.4.3	Berechnung des Standortes	57
4.4.4	Mögliche Probleme bei der Kameramethodik	57
4.5	Zusammenspiel der Komponenten	58

4.5.1	Bewertung des Systems	58
5	Das Leitsystem	60
5.1	Augmented Reality	60
5.2	Mensch-Maschine Interaktion (MMI)	63
5.2.1	Die Frage nach der Einordnung in ein bekanntes Themengebiet	63
5.2.2	Hardware zur Interaktion	64
5.2.3	Gestaltung der Informationen	66
5.2.4	Anordnung der Interaktionselemente	67
5.2.5	Festlegung der Datenbasis	68
5.2.6	Kriterien der MMI	70
5.3	Medien für die Ein- und Ausgabe	71
5.3.1	Definition	71
5.3.2	Die Eingabeschnittstelle	71
5.3.3	Datenformate für die Ausgabe	73
5.3.4	Die virtuelle Szene	75
5.3.5	Überprüfung der Vorgaben zur MMI	75
5.4	Kürzeste Wege	75
5.4.1	Komplexität und Prioritätswarteschlange	76
5.4.2	Algorithmen zur Lösung der Kürzesten-Wege-Problematik	78
5.4.3	Modifikation des Dijkstra Algorithmus	81
5.4.4	Implementierte Berechnung des kürzesten Weges	82
5.5	Erweiterung des Visualisierungsfensters	84
5.5.1	2D Übersichtsfenster	85
5.5.2	Die Oberfläche im Überblick	86
6	Anwendungsbeispiele	88
6.1	Detektion von Strukturen im Gelände	88
6.1.1	Analyse der Detektion	91
6.1.2	Berechnung der Position aus Objektkoordinaten	93
6.2	Einsatz der Komponenten des Leitsystems	94

6.3	Weitere Einsatzgebiete	98
7	Ausblick	100
7.1	Weiterführende Schritte	100
7.2	Gefahrenpotential zukünftiger Entwicklungen	101
	Literaturverzeichnis	103

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anwendungsgebiet im Verbundprojekt	3
2.1	Historische Geräte zur Navigation und Positionsbestimmung	9
2.2	Unterschiedliche Kartenwerke	10
2.3	Die 3 Segmente des GPS	12
2.4	Satelliten-Konstellation	12
2.5	DGPS Prinzipschema	13
2.6	Erreichbare Genauigkeiten bei GPS	13
2.7	Positionsfehler eines Low-Cost INS	15
2.8	Muster für die Verwendung von ARToolKit	15
2.9	Beschleunigungen beim menschlichen Gang	17
2.10	Anwendungsbeispiel zu ARToolKit	18
2.11	Aufbau von GALILEO	19
2.12	Prinzipskizze von RFID	20
2.13	Prinzipskizze von Assisted GPS	20
3.1	Beispiel für die Anwendung des Thresholding	25
3.2	Gleitendes Mittelwertfilter	27
3.3	Gauß Filter	28
3.4	Median Filter	29
3.5	Bilateral gefiltertes Binärbild	30
3.6	Schema einer Gauß Pyramide	31
3.7	1. Schritt der Gauß Pyramide	31

3.8	Beispiel für den Canny Operator	33
3.9	Beispiel für die Hough-Transformation	34
3.10	Beispiel für den optischen Fluss	36
4.1	Das entwickelte Gesamtsystem	38
4.2	Ablauf der Transformation	42
4.3	Ablauf der Auslesung und Verarbeitung	45
4.4	Xsens IMU	46
4.5	Drehung des Inertialsensors zur Kalibrierung	48
4.6	Beispielmessung der verwendeten IMU	49
4.7	Ablaufdiagramm zur Auswertung der IMU Messwerte	50
4.8	Gefilterte Messungen	51
4.9	Ergebnisse des erläuterten Vorgehens bei unterschiedlichen Sensorzuständen	53
4.10	Firewire Videokamera	54
4.11	Ablauf der Kameramethodik	55
5.1	AR-Implementierungen aus dem Bereich der Touristeninformation	61
5.2	AR Ansatz zur Konstruktion von Gebäuden	62
5.3	AR Ansatz aus dem militärischen Umfeld	62
5.4	Aufteilung der Anzeige bei AR	68
5.5	Daten zur Tiefenberechnung	69
5.6	Visualisierbares Dreiecksnetz	69
5.7	Vergleich von fensterbasierten und textbasierten Interaktionselementen	72
5.8	Unterarmtastatur zur Interaktion	73
5.9	Menü-Hierarchie zur tastaturgesteuerten Interaktion	73
5.10	Komplexes Interaktionselement	74
5.11	3D Grafikprimitive	74
5.12	Unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten von $f(n)$	77
5.13	Initialisierter, leerer Radix Heap	77
5.14	Gefüllter Heap	78
5.15	Heap Operationen	79

5.16	Beispiel zum Dijkstra Algorithmus	80
5.17	Komplexitäten des Dijkstra Algorithmus	82
5.18	Berechneter Weg	83
5.19	Weg im zugrundeliegenden Dreiecksnetz	83
5.20	Zusätzlich eingespiegelte Informationen	84
5.21	2D Fenster mit farbcodierte Darstellung des Geländes	85
5.22	Implementierte Elemente der Interaktion	86
5.23	Anordnung der Elemente im Vergleich zur Vorgabe	87
6.1	Detektion einer Dachkante	89
6.2	Detektierte Gebäudestruktur	90
6.3	Detektierte Hauskante	91
6.4	Detektierte Straßenlaterne	91
6.5	Detektierter Baumstamm	92
6.6	Detektion von Strukturen im Gelände	92
6.7	Tastatursteuerung	95
6.8	Statusanzeige	95
6.9	Übersichtsfenster	96
6.10	Anwendung des Fadenkreuzes	97
6.11	Mittels AR eingespiegelter kürzester Weg	98

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der GPS und IMU Eigenschaften	16
4.1	Abfragenachrichtenformat bei NMEA0183	39
4.2	Inhalt einer Nachricht mit GGK Kennung	40
4.3	Natürliche Gehgeschwindigkeiten des Menschen	42
5.1	Einsetzbarkeit der unterschiedlichen Hardware	66
5.2	Einsetzbarkeit unterschiedlicher Daten	68
5.3	Komplexitäten des Dijkstra Algorithmus	81
6.1	Genauigkeitsbetrachtung detektierter Objektkoordinaten	93
6.2	Genauigkeitsbetrachtung zur Bestimmung der eigenen Position	94
6.3	Platzbedarf der Komponenten	98

Abkürzungsverzeichnis

AGPS	A ssisted G PS
APSP	A ll P airs S hortest P ath
AR	A ugmented R eality
CDMA	C ode D ivision M ultiple A ccess
DAB	D igital A udio B roadcast
DGPS	D ifferentielles G PS
DOM	D igitales O berflächen M odell
EGNOS	E uropean G eostationary N avigation O verlay S ervice
ESA	E uropean S pace A gency
GIS	G eo I nformations S ystem
GK	G auß K rüger
GLONASS	G LO B al N avigation S atellite S ystem
GNSS	G lobal N avigation S atellite S ervices
GPS	G lobal P ositioning S ystem
GSM	G lobal S ystem for M obile C ommunications
GUI	G raphical U ser I nterface
HCI	H uman C omputer I nteraction
HMD	H ead M ounted D isplay
HUD	H ead U p D isplay
IMU	I nertial M easurement U nit
INS	I nertial N avigation S ystem
ISA	I nertial S ensor A ssembly
JDBC	J ava D ata B ase C onnectivity
LBS	L ocation B ased S ervices
LORAN-C	L On G R AN G e N avigation
MEMS	M icro- E lectro- M echanical S ystems

MMI	M ensch M aschine I nteraktion
NAVSTAR	N avigation S atellite T iming A nd R anging
NMEA	N ational M arine E lectronics A ssociation
PDA	P ersonal D igital A ssistent
PDGPS	P räzises D GPS
PNA	P ersonal N avigation A ssistant
RFID	R adio F requency I dentification
RRWS	R äumlicher R ückwärtsschnitt
RTK	R eal T ime K inematic
SAPOS	S atelliten P OSitionierungsdienst
SPSP	S ingle P air S hortest P ath
SSSP	S ingle S ource S hortest P ath
TFT	T hin F ilm T ransistor
UMTS	U niversal M obile T elecommunications S ystem
WIMP	W indows, I cons, M enus and P ointing D evice
WLAN	W ireless L ocal A rea N etwork

Kapitel 1

Einleitung

A new wave of technological innovation is allowing us to capture, store, process and display an unprecedented amount of information about our planet and a wide variety of environmental and cultural phenomena. ([Gore 1998])

1.1 Motivation

Die Navigation im Gelände ist durch die Verwendung mobiler Plattformen und neuester Technologien zuverlässiger und sicherer geworden. Musste man sich früher noch damit begnügen eine gewünschte Route durch verbale Beschreibungen zu erfahren, bis zu einem gewissen Grad durch Beschilderungen geleitet zu werden oder sich anhand von analogen Karten zu orientieren, so gelingt es gegenwärtig durch digitale Medien stets über seinen momentanen Aufenthaltsort und den weiteren Verlauf des Weges Bescheid zu wissen. Vor allem der Sektor der Fahrzeugnavigation stellt dem Endanwender ständig technische Innovationen zur Verfügung. Was somit heute bei Fahrzeugen der Oberklasse zur Serienausstattung eines PKWs gehört und bei preisgünstigeren Modellen in unterschiedlichsten Ausführungen nachrüstbar ist, sind „Navigationssysteme“. Angetrieben durch den ständigen Wunsch des Menschen sich auf den Straßen zurechtzufinden, schnellstmöglich seine Route zurückzulegen oder besonders interessante Plätze während der Vorbeifahrt zu erleben, entwickeln sich diese Systeme ständig weiter. Auch durch die Tatsache, dass in der heutigen Zeit ein Großteil aller vom Mensch zurückgelegten Wege mit dem Auto bewältigt werden, fördert diese Entwicklung. Von besonderem Interesse sind solche Systeme auch für Transportunternehmen. Funktionen wie Tourenplanung, Flottenüberwachung oder Güterverfolgung gehören hier schon seit längerem zur Grundausstattung eines modernen Flottenmanagementsystems.

Die Bemühungen der Anbieter solcher Systeme, aktuelle Daten zur Verfügung stellen zu können, reichen soweit, dass zur Datenaufnahme und -aktualisierung nicht mehr nur die Daten der Landesvermessungsämter herangezogen werden, sondern stattdessen eigens eingestelltes Personal die Straßen abfährt, diese kartiert und dem vorhandenen Datenbestand zuführt [NAVTEQ 2005]. Weiterhin kann der Nutzer selbst Teil eines Systems bestehend

aus mehreren verteilt operierenden Anwendern werden. Indem er andere Verkehrsteilnehmer in einem Ad-hoc-Netzwerk durch sogenannte *Car-To-Car Communication* über existierende Gefahrenstellen wie vorhandene Staus, Aquaplaning oder sonstige Informationen von Interesse informiert oder selbst Informationen empfängt (eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschung gibt [Franz 2004]), besteht für ihn die Möglichkeit aktiv, in den Informationsaustausch einzugreifen. Die Darstellung der notwendigen Informationen beschränkt sich nicht mehr nur auf installierte Displays. Stattdessen wird dazu übergegangen, die Windschutzscheibe als Anzeige zu integrieren (ein Beispiel hierfür zeigt [SIEMENS 2005]). Dies hat zwar zur Folge, dass die Darstellung von Details eingeschränkt ist, dafür aber die Fahrsicherheit erhöht wird, da der Fahrer seinen Blick nun permanent auf die Straße gerichtet lassen kann. Das System kommuniziert zusätzlich mittels Sprachausgabe mit dem Anwender. Für eine klare und deutliche Vermittlung von Ansagen werden die bereits installierten Lautsprecher im Fahrzeuginneren verwendet. Auch was die Bestimmung der Position betrifft, so ist es Systemen der Fahrzeugnavigation möglich verschiedene Quellen zu bemühen. Hierzu zählt insbesondere das Odometer zur zusätzlichen Bestimmung des zurückgelegten Weges und der damit verbundenen effizienteren Bestimmung des eigenen Standortes.

Wie der vorangegangene Textabschnitt zeigt, ist die Fahrzeugnavigation sowohl technisch als auch in der Verbreitung recht weit fortgeschritten. Die treibende Kraft bei der Entwicklung solcher Systeme ist die Automobilindustrie. Im Gegensatz hierzu befindet sich die Fußgängernavigation im Gelände noch in der Forschung und Erprobung und ist demzufolge über die Experimentierphase noch nicht hinweg. Auch wenn die technischen Voraussetzungen gegeben sind, so bieten die Endgeräte noch nicht den notwendigen Komfort und die Zuverlässigkeit für eine breite Einsetzbarkeit und Akzeptanz. Deshalb ist eine Adaption der Fahrzeugnavigation für Fußgänger nicht möglich.

Die Ausgabegeräte bei der Navigation von Fußgängern sind meist mit einem Display versehen, welches eine Darstellung hochauflösender Daten nicht zulässt. Doch gerade dies ist für Fußgänger ein wichtiges Kriterium, da sie sich oft auf kleineren, verwinkelten oder nicht kartierten Wegen fortbewegen. Eine detaillierte Darstellung ist deshalb von Nöten, um dem Anwender zumindest die Möglichkeit zu bieten, die eigene Position oder Orientierung aus den vorhandenen Daten abzuleiten. Auch sind sowohl Qualität als auch Robustheit der angebotenen Systeme meist unzureichend und somit für den Einsatz im Gelände auch bei widrigen äußeren Bedingungen nicht zu empfehlen. Demzufolge finden solche Systeme im Alltagsgebrauch durch Privatkunden nur sehr geringe Verbreitung. Stattdessen werden Geräte verwendet, welche primär als Mobillösungen für die Fahrzeugnavigation konzipiert sind und somit den Anforderungen der Fußgängernavigation oftmals nicht genügen. Was die Anwendbarkeit eines solchen Systems aus Sicht der Zuverlässigkeit betrifft, so existieren auch hier noch Defizite. Die Versorgung mit aktuellen Daten ist noch nicht flächendeckend gesichert. Dadurch ist der Anwender auf die Verwendung lokal mitgeführter Daten angewiesen und bei fehlerhafter oder unvollständiger Datenlage oft auf sich alleine gestellt. Auch die Bestimmung des eigenen Standortes ist ein Problem bei der Fußgängernavigation. Es existiert zwar eine Vielzahl einsetzbarer Systeme, doch mangelt es diesen entweder an der notwendigen Genauigkeit, oder sie sind für den Einsatz im Gelände zu unhandlich.

Das Ziel sollte es demnach sein, einem potentiellen Nutzer eine Möglichkeit zur Navigation zur Verfügung zu stellen, welche Zuverlässigkeit bei entsprechender Genauigkeit sicherstellt. Die Miniaturisierung der Systemkomponenten wird durch immer kleiner werdende Bauteile stetig vorangetrieben und löst somit zumindest bis zu einem gewissen Teil das Problem der Portabilität.

1.1.1 Projekthintergrund

Die nachfolgende Arbeit ist im Rahmen des BMBF und DFG geförderten Verbundprojektes „Weiterentwicklung von Geodiensten“ (eine Zusammenfassung der Ziele und Ergebnisse geben [Breunig u. a. 2005]) entstanden. Die Aufgabe bestand darin, für eine Anwendung aus dem Bereich der Geowissenschaften eine Schnittstelle mit der Natur zu entwickeln welche die Experten vor Ort in ihren täglichen Aufgaben unterstützt.

Abbildung 1.1 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Anwendungsgebietes am Winkelgrat südwestlich von Laufen im Zollernalbkreis. In einem Abschnitt des Albtraufs werden seit Jahren aktive Kriechbewegungen beobachtet [LGRB Baden-Württemberg 2002]. Diese stellen eine potentielle Gefährdung einer in der Nähe verlaufenden Kreisstraße dar. Deshalb wurde vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg ein Überwachungssystem eingerichtet, welches mittels Extensiomern die auftretenden Bewegungen kontinuierlich aufzeichnet. Bei Überschreitung gewisser Grenzwerte wird ein Alarm ausgelöst und ein Mitarbeiter muss die Situation vor Ort begutachten. Ein Aug-



Abbildung 1.1: Anwendungsgebiet im Verbundprojekt

mented Reality System (ARS) kann den Geowissenschaftler hierbei unterstützen. Durch die Einspiegelung gespeicherter Daten kann vor Ort der aufgetretene Versatz mit einem früheren Zeitpunkt verglichen werden. Es können aktuelle Messungen in Echtzeit an den entsprechenden Messpunkten im Gelände sichtbar gemacht werden. Außerdem kann ein solches System eine Kartierhilfe zur Aufnahme neuer Elemente darstellen.

Der Vorteil eines solchen Systems besteht somit darin, dass dem Nutzer Sachverhalte eingespiegelt werden, welche er ohne ein solches System nicht oder nur schwer hätte erkennen

können. Durch die Überlagerung im Gelände in Echtzeit werden Zustände verständlicher und Zusammenhänge erfassbar.

Bei all den genannten Anwendungsmöglichkeiten eines ARS tritt das Problem der unzureichenden Positionsbestimmung in einem bewaldeten Gebiet in den Vordergrund. Dies diene als Motivation für die in dieser Arbeit vorgestellten Entwicklungen und bestimme die Zielsetzung, welche nachfolgend erläutert werden soll.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Entwicklung von Augmented Reality Systemen zu liefern. Die bei der Aufgabenstellung im vorigen Abschnitt auftretenden Fragen bezüglich der Navigation und Interaktion gilt es zu erörtern, Lösungen hierfür zu finden und diese zu implementieren. Diese können durchaus auch bei anderen Disziplinen, wie der autonomen Navigation im Gelände, und in anderem, zum Beispiel urbanem, Gelände zur Anwendung kommen. Von besonderem Interesse sind hierbei Ansätze, welche bereits zum jetzigen Zeitpunkt richtungsweisend und aus anderen Disziplinen bekannt sind und deren Verwendung fächerübergreifend vorstellbar ist. Außerdem wird eine Lösung angestrebt, welche zwar einen multisensorbasierten Ansatz wählt, allerdings unter dem Gesichtspunkt, dass lediglich solche Sensoren zur Anwendung kommen, welche ohnehin für die Realisierung eines ARS verbaut werden.

Durch die Tatsache, dass ein solches System sich in den Bereich der Fußgängernavigation einordnen läßt, entstehen hierbei ähnliche Anforderungen wie sie bereits in Abschnitt 1.1 erläutert wurden. Gerade die Bestimmung des eigenen Standortes im Gelände ist mit diversen Problemen verbunden:

1. A-priori Wissen über die Umgebung ist meist nicht vorhanden.
2. Ebenso ist eine Unterstützung der Navigationskomponente durch das gezielte Präparieren der Landschaft oft nicht möglich. Dadurch ist es umso wichtiger, die sich bietenden Gegebenheiten zu nutzen und auftretende Schwachpunkte durch geeignete Ansätze zu kompensieren.
3. Es gilt zu untersuchen, welche Sensoren, die ohnehin bereits beim Aufbau des Systems berücksichtigt werden, sich koppeln lassen und so zur Stabilisierung der Positionsbestimmung beitragen.

In einem weiteren Schritt ist es notwendig, dem Nutzer eine Möglichkeit zur Interaktion mit dem System zu bieten. Hierfür muß untersucht werden, welche Geräte den Anforderungen eines mobilen Systems gerecht werden und welche Einschränkungen sich dadurch für die Benutzersteuerung ergeben. Darauf aufbauend ist es dann möglich, einen Lösungsweg prototypisch zu implementieren.

1.3 Gliederung der Arbeit

Das folgende zweite Kapitel beginnt mit einer historischen Betrachtung des Navigationsproblems. Es werden erste Verfahren und Geräte vorgestellt und auf den aktuellen Stand der Technik übergeleitet. Dieser konzentriert sich auf den Bereich der Fußgängernavigation. Gleiches gilt für den sich daran anschließenden Blick auf zu erwartende Entwicklungen.

Kapitel drei stellt grundlegende Methoden und Verfahren der Digitalen Bildverarbeitung und der Auswertung von digitalem Bildmaterial vor. Diese bilden einen Teil der implementierten Lösung zur Positionsbestimmung.

Die Vorstellung der entwickelten Navigationslösung erfolgt im vierten Kapitel. Hier werden sowohl die einzelnen Sensoren und die implementierten Methoden vorgestellt, als auch deren Zusammenwirken erläutert.

Kapitel fünf beschreibt die für die Interaktion implementierten Schnittstellen. Es wird außerdem auf die speziellen Anforderungen bei deren Gestaltung in Augmented Reality Systemen hingewiesen.

Wie sich der entwickelte Lösungsansatz beim tatsächlichen Gebrauch im Gelände verhält, wird im sechsten Kapitel präsentiert. Beispielaufnahmen zeigen die Komponenten zur visuellen Unterstützung bei der Navigation und die Ergebnisse zur Bestimmung der Position, die sich durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Sensoren ergeben.

Im abschließenden siebten Kapitel wird auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der implementierten Ansätze eingegangen. Dabei stehen softwareseitige Tendenzen im Vordergrund. Zum Schluss werden Trends der Informationstechnologie kritisch betrachtet. Dies dient dazu, die Entwickler zukünftiger Navigationslösungen mit zu erwartenden Datenschutzproblematiken vertraut zu machen.

Kapitel 2

Navigation

Der Inhalt dieses Kapitels gibt dem Leser einen Einblick in den technischen Stand der Navigation im Gelände. Aufbauend auf einem historischen Streifzug durch die Geschichte der Navigation, werden sowohl aktuelle Techniken der Gegenwart beleuchtet, als auch ein Ausblick auf zukünftige Verfahren gegeben. Besonderes Augenmerk wird dabei auf Methoden und Systeme gelegt, die aus dem Bereich der Fußgängernavigation bekannt sind und in einem AR System Anwendung finden können.

2.1 Begriffserklärung

Das aus dem Lateinischen stammende Wort *navigatio* bezeichnet allgemein die Schifffahrt. Nach [DUDEN 2005] existiert eine konkretisierte Definition dieses Begriffs, welche die damit verbundenen Aufgaben und andere Fortbewegungsmittel, neben dem Schiff, enthält:

Bei Schiffen, Luft- und Raumfahrzeugen Gesamtheit der Maßnahmen zur Bestimmung des Standorts und zur Einhaltung des gewählten Kurses.

Mit anderen Worten, beschreibt Navigation zum einen das Problem der Bestimmung der Position in einem definierten Raum und zum anderen das Nachfolgen eines Weges zwischen zwei bekannten Orten. Die notwendigen Maßnahmen zum Navigieren umfassen die Bestimmung der Position durch verschiedenste Verfahren, die Berechnung des Weges zum Ziel und das Lenken des Fahrzeuges. Hierauf aufbauend ergeben sich zusätzliche Aufgaben, wie die Optimierung der Geschwindigkeit oder das Reagieren auf unvorhersehbare Situationen. Es handelt sich aber keineswegs um das Navigieren in virtuellen Welten. Auch nicht um das Zurechtfinden in digitalen Medien, wofür dieser Begriff oft synonym verwendet wird.

Die Photogrammetrie greift auf diese rein verbale Definition zurück und fasst die Position und die Orientierung in einem Satz von Parametern zusammen. In [Kraus 1997] findet sich dazu die folgende Ausführung:

X_0, Y_0, Z_0 Objektkoordinaten des Aufnahmeortes

3 Drehungen des Bildes (z. B. ω, ϕ, κ)

Die **sechs Parameter** sind die Elemente der **äußeren Orientierung**. Sie legen das Projektionszentrum und die Stellung des Bildes im Objektkoordinatensystem fest.

Die *äußere Orientierung* beschreibt somit eines der beiden Probleme bei der Navigation: Die Bestimmung des Standortes im Raum. Über das Problem zur Einhaltung des Kurses wird in dieser Definition keine Aussage getroffen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Bestimmung der Position und der Orientierung getrennt voneinander behandelt. Der Grund hierfür ist der, dass das verwendete System für die Bestimmung von Position und Orientierung zwei unterschiedliche Sensoren benutzt. Somit ist in diesem Zusammenhang die getrennte Betrachtungsweise einer gemeinsamen vorzuziehen.

Der Raum, in dem man sich in diesem Kontext zurechtfinden soll, wird hier klassisch geodätisch definiert. Das heißt, dass er auf Bezugs- und Parametersystemen sowie Koordinaten beruht. Typischerweise verwendet man bei Bezugssystemen für die Lage ein Rotationsellipsoid (z.B. Bessel1841, WGS84) und für die Höhe das Geoid. Das zugehörige dreidimensionale, orthogonale und geradlinige Koordinatensystem wird über ein entsprechendes Dreibein definiert. Vor allem ellipsoidische Koordinaten (geographische Breite und Länge, sowie ellipsoidische Höhe) oder in der Ebene Gauß-Krüger-Koordinaten (Rechts- und Hochwert) sind in Deutschland gebräuchlich für die Angabe der Position.

2.2 Qualitätsaspekte bei Navigationslösungen

Beim Entwurf geodätischer Netze gilt es gewisse Anforderungen zu erfüllen [van Mierlo u. Müller 1986]. Diese lassen sich ohne weiteres auf andere Systeme übertragen und erläutern. Bei einem Navigationssystem sollten unabhängig von der zugrundeliegenden Anwendung, die nachfolgenden drei Kriterien zur Beurteilung seiner Qualität erfüllt sein:

- Genauigkeit
- Zuverlässigkeit
- Wirtschaftlichkeit

Genauigkeit bedeutet, dass zum einen angestrebte Genauigkeiten zu bestimmender Größen mit den verwendeten Messinstrumenten erreicht werden. Zum anderen, dass Erfahrungen und Erwartungen an diese Geräte bestätigt werden.

Zuverlässigkeit heißt, dass grobe Fehler in den Beobachtungen sich nur geringfügig auf abgeleitete Größen auswirken und ab einer gewissen Größe aufdeckbar sind.

Wirtschaftlichkeit drückt sich in der Gestaltung des Systemaufbaus und den notwendigen Vorbereitungen aus. Hier soll ein wirtschaftlicher und finanziell sinnvoller Rahmen nicht überschritten werden.

In diesem Zusammenhang bedeutet dies, dass ein solches System mit dem geringsten vertretbaren Aufwand betrieben werden können soll. Dabei muss aber die Genauigkeit der geplanten Nutzung angepasst sein und gleichzeitig muss es gegen grobe Fehler abgesichert

werden. Es gilt die einzelnen Anforderungen in Einklang mit den anderen zu bringen und so eine ausgewogene Lösung zu erarbeiten.

2.3 Historischer Hintergrund

Bereits früh in der Geschichte entdeckte die Menschheit die Notwendigkeit zur Navigation. Ob zum Treiben von Handel, der Besiedelung neuer Länder oder Erforschung fremder Kulturen, jedesmal bestand die Aufgabe von einem Ort zu einem anderen zu navigieren. Begibt man sich in der Geschichte zurück bis etwa 1000 v. Chr., so sind es die Phönizier die in dieser Zeit das Mittelmeer beherrschten. Ihr Einflussgebiet reichte vom heutigen Libanon über Zypern und Italien, Nordafrika bis nach Spanien [Pohl 2004]. Sie galten als hervorragende Seefahrer und reisten mit ihren Schiffen auch über das Mittelmeer hinaus. Damit folgten sie dem Griechen *Kolaïos von Samos* durch die Säulen des Herakles, der diesen Weg bereits 200 Jahre vor den Phöniziern, wohl eher durch Zufall, durchsegelt hatte [IMPERIUM-ROMANUM 2005]. *Himilkon*, ein karthagischer Seefahrer, erkundete 480 v. Chr. Britannien mit dem Ziel die Zinnvorkommen der Britischen Inseln zu erschließen. Um 470 v. Chr. begab sich *Hanno der Seefahrer* auf Entdeckungsfahrt entlang der Westküste Afrikas bis zum Golf von Guinea [Codex Palatinus Graecus 910].

Ein weiterer erwähnenswerter, vorchristlicher Entdecker zur See war *Pytheas von Massilia*. Er umrundete Westeuropa (Beginn 330-320 v. Chr.) auf dem Seeweg und gelangte so bis zum antiken, durch ihn beschriebene Thule [Stichtenoth 1959]. Ein Vergleich mit heutigen Unterlagen ergibt, dass er laut seinen Aufzeichnungen somit entweder die Shetlands, Island oder Mittelnorwegen erreicht haben muss.

Sowohl zu Wasser als auch zu Lande erfolgte in jener Zeit die Navigation mit Hilfe der sogenannten Koppelnavigation welche aus der Messung von Kurs, Fahrt und Zeit besteht. Ebenso wurden die Astronavigation und die Positionsbestimmung mit Hilfe von Landmarken betrieben. Zu See wurde zur Navigation außerdem die beobachtete Meerestiefe verwendet. Diese ist aus Messungen mit dem Lot bestimmbar. Ein wichtiger Aspekt dieser Entdeckungsfahrten war außerdem die Erzeugung von Seekarten, zur Dokumentation der bereisten Gebiete. Damit standen auch für die Nachfahren Pläne zur Verfügung die es erlaubten, entdeckte Länder gezielt wiederzufinden.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgten die Römer mit den von ihnen erzeugten Itinerarien. Dies sind Karten welche Informationen über die damals existierenden Verkehrswege enthalten. Der Zweck solcher Dokumente war, Informationen bezüglich Reiserouten inklusive Etappenorten und Distanzangaben vorzuhalten [Bolliger 2004].

Die aus technischer Sicht weitreichendste Erfindung wurde bereits im 3. Jahrhundert n. Chr. gemacht. Die Chinesen erfanden zu dieser Zeit den Kompass, welcher jedoch erst sehr viel später von den Arabern nach Europa exportiert wurde. Die Navigation europäischer Entdecker beeinflusste er somit erst ab dem 12. Jahrhundert wesentlich. Ab dem Spätmittelalter wurde die Koppelnavigation stetig durch die großen Entdecker wie *Marco Polo*, *Vasco da Gama*, *Ferdinand Magellan* oder *James Cook* verbessert. Als Messinstrumente dienten das Astrolabium(14./15. Jhd.), der Oktant(17. Jhd.) und später auch der Sextant(18. Jhd.), alle zu sehen in Abbildung 2.1. Dadurch entstanden immer mehr und immer genauere Karten, welche bis heute an Bedeutung nicht verloren haben. Abgelöst

wurde der Sextant im Bereich der Landvermessung durch den Theodoliten(19. Jhd.), wohingegen er erst durch die Entwicklung des GPS(20. Jhd.), seine Bedeutung zur See verlor.



(a) *Astrolabium*



(b) *Oktant*



(c) *Sextant*

Abbildung 2.1: Historische Geräte zur Navigation und Positionsbestimmung (Quelle: [Stanley London 2005]; Copyright ©2006 Stanley Morgan)

2.4 Verfahren der Gegenwart

Sowohl Karte als auch Kompass besitzen aufgrund ihrer einfachen Handhabung und ihrer Zuverlässigkeit bis heute ihren berechtigten Stellenwert in der Navigation und werden diesen wohl auch noch eine gewisse Zeit behalten. Desweiteren trägt die Vielfalt an Kartenwerken dazu bei, dass Karten in vielen Bereichen zur Anwendung kommen. Einige wenige Beispiele zeigt Abbildung 2.2. Vor allem im Bereich der Landstreitkräfte der Militärs werden sie nach wie vor eingesetzt. Trotzdem ist es notwendig Verfahren zu verwenden die auch bezüglich der Genauigkeit die erforderlichen Ansprüche zu erfüllen vermögen.



(a) TK25



(b) Wanderkarte 1:40000



(c) Radwanderkarte 1:75000

Abbildung 2.2: Unterschiedliche Kartenwerke (Quelle: [LGN 2006])

2.4.1 Weiterentwicklungen historischer Techniken

Insbesondere durch die langjährigen Aufzeichnungen, der dadurch erfolgten Verdichtung des vorhandenen Kartenmaterials und durch langjährige Erfahrungen ließen sich die bekannten Methodiken des Altertums weiterentwickeln. Wichtig war in diesem Zusammenhang auch, dass die zu verwendenden Geräte technisch verbessert wurden und zusätzliche Hilfsmittel wie z. B. Seezeichen, die Navigation erleichterten. Die heutzutage üblichen Arten der Navigation sind somit die folgenden:

- **Terrestrische Navigation:** Positionsbestimmung mit Hilfe von Landmarken, Funkbaken und Seezeichen. Dabei definiert der Schnitt mindestens zweier Standlinien¹ die aktuelle Position.
- **Sichtnavigation:** Basiert auf dem Vergleich von geeignetem, mitgeführtem Kartenmaterial und dem beobachteten Gelände.
- **Astronomische Navigation:** Bestimmung der Position durch die Beobachtung der Gestirne (Sonne, Mond, Planeten oder Fixsterne).
- **Koppelnavigation:** Ortung durch kontinuierliche Messung von Kurs, Fahrt und Zeit.

¹Eine Standlinie beschreibt die gedachte Linie zwischen Beobachter und beobachtetem Objekt. Es handelt sich hierbei jedoch nicht zwangsläufig um eine Gerade.

Entwicklungen und Methodiken die sich erst durch die fortschreitenden technischen Möglichkeiten der Moderne und die Miniaturisierung der Bauteile ergaben sollen im folgenden vorgestellt werden. Es handelt sich dabei um Verfahren, die heute in vielen Bereichen der Navigation als selbstverständlich angesehen werden.

2.4.2 Funknavigation

Hierunter versteht man die Zusammenfassung aller Verfahren, welche Radiowellen zur Positionsbestimmung nutzen. Man unterscheidet hierbei zwischen Fremd- (Aktives Senden von Funkzeichen durch das zu peilende Objekt) und Eigenpeilung (Peilung mit Hilfe eines Peilempfängers, von Funkausstrahlungen bekannter Sender), [Funknavigation 2001]. Insbesondere in den Bereichen See- und Luftfahrt ist dieses Verfahren weit verbreitet. Durch modernere Methoden wie die Satellitennavigation jedoch, hat sie an Stellenwert verloren. Sie wird aber weiterhin als Ergänzung zu den konventionellen Verfahren eingesetzt.

Einen Ansatz welcher auf der Auswertung der Signalstärken in einem WLAN (*engl. für: Wireless Local Area Network*) beruht, beschreiben [Ibach u. a. 2004]. Die eigene Position wird dabei durch die Auswertung der Signalstärke aller empfangbaren Access Points und Peers bestimmt. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei etwa 5 Metern.

2.4.3 Satellitennavigation

Im engeren Sinne gehört die Positionsbestimmung mit Hilfe von Satelliten zu den Verfahren der Funknavigation, denn auch hier handelt es sich bei der zugrundeliegenden Technik um eine Kombination aus Senden und Empfangen von Funkwellen. Da dieses Navigationsverfahren weit verbreitet ist, vielfältige Anwendungsfelder besitzt und ihm im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Rolle zukommt, sollen das Prinzip und die Elemente dieser Technik näher vorgestellt werden.

Zur Zeit existieren zwei Systeme. Zum einen das US-amerikanische GPS (*engl. für: Global Positioning System*) und zum anderen sein russisches Pendant GLONASS (*für: Global Navigation Satellite System*), [GLONASS 2005], dessen momentaner Systemzustand jedoch für einen vollständigen Gebrauch nicht ausreichend ist. Da im Rahmen dieser Arbeit auf das US-amerikanische System zurückgegriffen wird, soll in dieses nachfolgend eingeführt werden.

NAVSTAR-GPS, [NAVSTAR GPS 2005], ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium ersonnenes, realisiertes und betriebenes, satellitengestütztes Radionavigationssystem, welches landläufig besser unter dem Namen GPS bekannt ist. Es besteht aus drei Komponenten, dem Raum-, Nutzer- und Kontrollsegment, siehe Abbildung 2.3.

Das Raumsegment bildet das Kernelement des Navigationssystems. Es besteht aus 24 Satelliten welche sich auf 6 Bahnebenen verteilen, die jeweils um 60° in der Äquatorebene gegeneinander versetzt und mit je 4 Satelliten äquidistant besetzt sind. Die Bahnneigung aller Satellitenbahnen gegenüber der Äquatorebene beträgt einheitlich 55° . Die Flughöhe

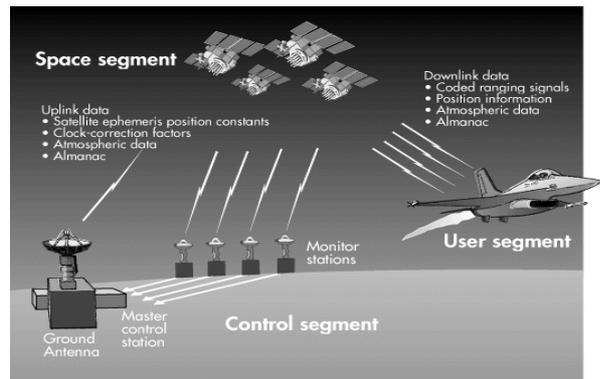


Abbildung 2.3: Die 3 Segmente des GPS (Quelle: [The Aerospace Corporation 2005a]; Graphic courtesy of The Aerospace Corporation (www.aero.org))

der Satelliten über der Erdoberfläche beträgt etwa 20200 km und ihre Umlaufzeit 12 Stunden. Abbildung 2.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Raumsegmentes.

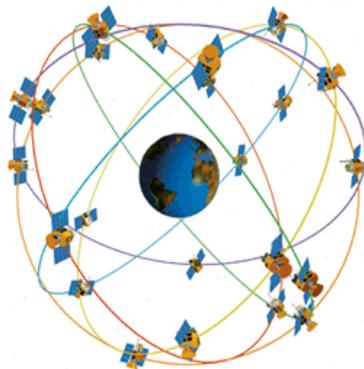


Abbildung 2.4: Satelliten-Konstellation (Quelle: [The Aerospace Corporation 2005b]; Graphic courtesy of The Aerospace Corporation (www.aero.org))

Das Kontrollsegment besteht aus 5 Monitor Stationen sowie einer Master Control Station (MCS). Die Aufgabe der Monitor Stationen besteht darin, die Satelliten zu überwachen und die gesammelten Rohdaten über Funktionsfähigkeit, Bahnen und Uhren der Satelliten an die MCS zu übermitteln. Dort werden nun die Bahnparameter sowie die Uhrkorrekturen aller Satelliten vorausberechnet und an die entsprechenden Satelliten versandt. Der Empfang und die Weiterverarbeitung der Satellitensignale werden dem Anwender von GPS mit dem Nutzersegment ermöglicht. Hierunter versteht man die für den Einsatz notwendige Hard- und Software.

Auf die einzelnen Beobachtungsverfahren und die Signalstrukturen soll an dieser Stelle lediglich auf [Heck u. a. 1993] verwiesen werden, wo die entsprechenden Details nachschlagbar sind.

Bei Anwendungen im Gelände stellt die Verwendung von GPS eine gebräuchliche Möglichkeit dar die eigene Position zu bestimmen. Dies gelingt bereits durch die Verwendung von Einfrequenzempfängern mit zumeist ausreichender Genauigkeit. Für den privaten Nutzer sind Genauigkeiten von mehreren Metern in den meisten Fällen durchaus akzeptal. Bei

Applikationen, welche jedoch die Position im Zentimeter- oder gar Millimeterbereich fordern, reicht eine solche Lösung nicht aus. Deshalb wird hierbei dazu übergegangen Zweifrequenzempfänger einzusetzen. Durch das Einbinden von Systemen wie SAPOS (Satellitenpositionierungsdienst, [SAPOS 2005]) oder EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service, [EGNOS 2005]), welche Korrekturdaten an den mobilen Empfänger schicken, oder das Aufstellen lokaler Referenzstationen mit der gleichen Aufgabe, lässt sich die erreichbare Genauigkeit weiter steigern. Ein solcher Aufbau ist beispielhaft in Abbildung 2.5 dargestellt.

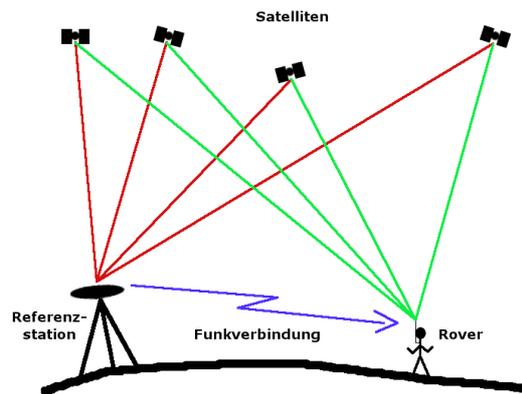


Abbildung 2.5: DGPS Prinzipschema

Allgemein spricht man bei diesem Verfahren von DGPS (*für*: Differential GPS). Je nach Art der verwendeten Daten lassen sich unterschiedliche Genauigkeiten erreichen. Eine Auflistung hierfür zeigt Abbildung 2.6.

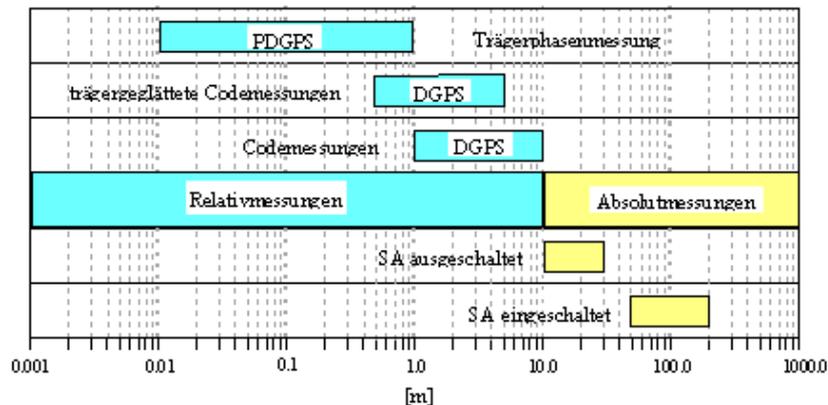


Abbildung 2.6: Erreichbare Genauigkeiten bei GPS (Quelle: [Seeber u. Schmitz 1996])

Die Zuverlässigkeit hingegen lässt sich nicht ohne weiteres optimieren. Diese hängt zu einem großen Teil von den äußeren Gegebenheiten ab. Bewegt man sich in ländlichen Gebieten, wo die Gefahr von Abschattungseffekten eher als gering einzustufen ist, so lässt sich eine kontinuierliche Positionsbestimmung erreichen. In Städten hingegen, wo man

sich häufig durch Häuserschluchten bewegt ist eine permanente Bestimmung des Ortes mit GPS kaum zu realisieren.

2.4.4 Trägheitsnavigation

Dieses Verfahren beruht auf der Verwendung von Beschleunigungssensoren und Kreiseln. Die Messwerte, Beschleunigung und Winkelgeschwindigkeit, finden in einem gemeinsamen Auswertevorgang Berücksichtigung. Dieser läßt sich vereinfacht in eine zweifache Integration der beobachteten Beschleunigungen und eine einfachen Integration der Winkelgeschwindigkeiten unterteilen. Die Ergebnisse werden anschließend in einer gemeinsamen Lösung kombiniert und liefern, zumindest in der Theorie, das gewünschte Resultat: den zurückgelegten Weg bzw. die momentane Position.

Zur klaren Unterscheidung der einzelnen Sensortypen existieren nach [ACFR 2005] die folgenden Bezeichnungen:

- **ISA–Inertial Sensor Assembly:** Liefert lediglich die reinen Messdaten.
- **IMU–Inertial Measurement Unit:** Ist eine ISA, jedoch werden die fehlerbehafteten Messungen korrigiert.
- **INS–Inertial Navigation System:** Ist eine IMU, jedoch werden die verbesserten Messungen mittels entsprechender Algorithmen verarbeitet. Damit lassen sich neben den reinen Messwerten, zusätzlich die intern berechnete Position, Geschwindigkeit und Orientierung auslesen.

Zur absoluten Bestimmung des Ortes kommen solche Systeme häufig in Verbindung mit anderen Sensoren zum Einsatz. Der Grund hierfür ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Bei sogenannten *Low-Cost* Systemen (Preis: 3000 US-\$ - 5000 US-\$), wie sie häufig eingesetzt werden, treten bereits nach sehr kurzer Zeit große Abweichungen in der berechneten von der gesuchten Position durch unterschiedliche Einflüsse auf. Sowohl bei den Beschleunigungs- als auch den Kreismessungen sind dies insbesondere systematische Messabweichungen, welche sich aufsummieren und nur durch geeignete Vorverarbeitung reduzieren lassen.

2.4.5 Kamerabasierte Navigation

Ähnlich der Sichtnavigation durch den Menschen, bei der signifikante Punkte im Gelände verwendet werden um sich zu orientieren, können Kameras eingesetzt werden um aus erkannten natürlichen und/oder künstlichen Marken die eigene Position und Orientierung zu bestimmen.

In diesem Zusammenhang ist vor allem die Open Source Bibliothek ARToolKit ([AR-TOOLKIT 2004]) für die programmtechnische Implementierung weit verbreitet. Dabei werden die von einer Videokamera aufgenommenen Bilder von der Software auf künstliche Marken unterucht. Die vom Programm zu findenden Marken sind zum Beispiel solche wie sie in Abbildung 2.8 dargestellt sind. Bei der Wahl des Inhaltes solcher Marken sind,

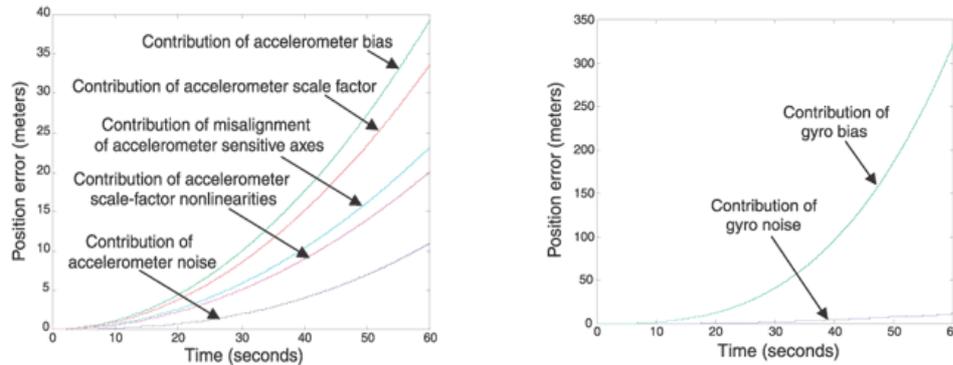


Abbildung 2.7: Positionsfehler eines Low-Cost INS (Quelle: [Soloviev u. van Grass 2004]; Image courtesy of GPS World magazine)

so lange die Muster detektiert werden können, keine Grenzen gesetzt. Nach Binarisierung des Eingabebildes und erfolgreicher Musterdetektion wird für die Kamera die Position und die Orientierung berechnet. Voraussetzung für das gerade beschriebene Vorgehen ist

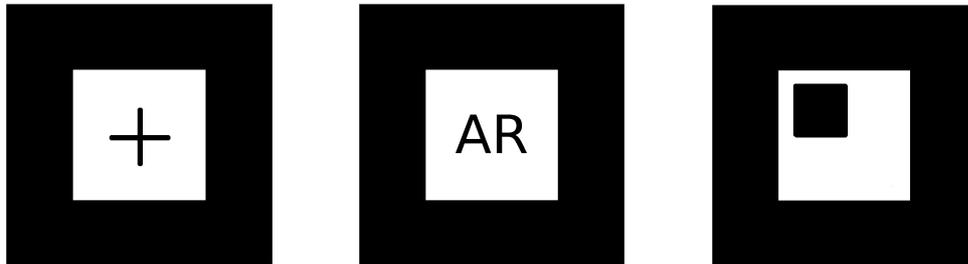


Abbildung 2.8: Muster für die Verwendung von ARToolKit

somit die Verwendung von künstlichen Marken. Diese müssen a-priori im zu navigierenden Raum angebracht und ihre Position muss bestimmt werden. Außerdem ist es erforderlich, dass das Programm die zu detektierenden Muster kennt.

2.4.6 Hybridnavigation

Dieses Verfahren besteht aus der Kombination verschiedener Navigationsverfahren. Hierbei werden die unterschiedlichen Methodiken entsprechend ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit gewichtet bzw. kombiniert.

Insbesondere die Verknüpfung der Satelliten- mit der Trägheitsnavigation, also die Verbindung von GPS und INS Messungen, findet in vielen Bereichen Verwendung. Der Grund hierfür liegt in den Eigenschaften der beiden verwendeten Sensortypen. Tabelle 2.1 zeigt diese. Es läßt sich erkennen, dass beide gegensätzliche Charakteristika aufweisen. Somit lassen sich zum einen kurze Zeitspannen in denen die Positionsbestimmung mittels GPS nicht möglich ist (Abschattung, Verfügbarkeit der Satelliten usw.) überbrücken und zum anderen kann das GPS durch gemessene Beschleunigungswerte gestützt werden.

Tabelle 2.1: Vergleich der GPS und IMU Eigenschaften

Eigenschaften	IMU	GPS
Auslesefrequenz	100 Hz	10 Hz
Langzeitstabilität	Schlecht	Gut
Kurzzeitstabilität	Gut	Schlecht
Autonomie	Ja	Nein

Die Anwendungsgebiete für ein solches Verfahren kommen aus den Bereichen der Fahrzeugnavigation [Sukkarieh u. a. 1998], dem sogenannten „Guidance and Control“ [Kim u. a. 2003], der flugzeuggetragenen Photogrammetrie [Grejner-Brzezinska 1999] und Gravimetrie [Kwon u. Jekeli 2001], sowie der Mobilien Datenerfassung [Tao 2000]. Bei den meisten Implementierungen in diesen Anwendungsfeldern wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass ein kompletter Satellitensignalverlust eintritt, sondern, dass stets eine ausreichende Näherung der Position mittels GPS ermittelbar ist.

[Wang u. a. 2003], [Kim u. a. 2004] oder auch [Noureldin u. a. 2004] präsentieren hingegen Ansätze, welche versuchen auch einen Totalausfall der Satellitensignale zu berücksichtigen. Auffällig hierbei ist, dass eine Überbrückung solcher Zustände nur für recht kurze Zeitintervalle mit akzeptabler Genauigkeit möglich ist. Weiterhin handelt es sich bei den zu navigierenden Plattformen um solche, deren Bewegungsform durch die zumeist konstanten Geschwindigkeiten und nicht vorhandenen, abrupten Richtungsänderungen kontrollier- und vorhersagbar ist. Dies ist bei Fußgängern nicht der Fall. Die Bewegungen sind durch das Zusammenspiel verschiedenster Körperteile um einiges komplexer.

Es existieren aber auch noch andere Ansätze für die Hybridnavigation. So schlägt [Abwerzger 2002] die Verbindung von GPS und LORAN-C (Long Range Navigation in der Entwicklungsstufe C) vor. Dabei besitzt LORAN-C gegenüber GPS den Vorteil, dass keine direkte Sicht zum Sender vorhanden sein muß und somit die Signale, zumindest regional, permanent zu empfangen sind. [Rooney u. a. 2000] hingegen verknüpfen GPS, GSM und DAB (Digital Audio Broadcast). Der Grund für die Hinzunahme von DAB liegt darin, dass in ländlichen Gegenden die Abdeckung mit GSM Sendern nur unzureichend gegeben ist. GPS in Verbindung mit CDMA (Code Division Multiple Access) ist eine von [Soliman u. a. 2000] vorgeschlagene Möglichkeit der Hybridnavigation. Weitere Implementierung zur Navigation autonomer, mobiler Systeme findet sich z. B. in [Wörn u. a. 1998]. Die Verbindung von GPRS/UMTS, GPS, Bluetooth und multidimensionaler Hochleistungsdatenbanksysteme für ein Parkleitsystem in Ballungszentren wird durch [Scharf u. Bayer 2002] vorgeschlagen.

2.4.7 Stand der Technik bei der Fußgängernavigation

Die Unterstützung des Fußgängers bei der Aufgabe der Navigation kann im Gelände auf unterschiedliche Art und Weise realisiert werden. So präsentieren [Baus u. a. 2002] ein System welches die Position lediglich durch die Verwendung von GPS bestimmt. Von

Nachteil ist hierbei nicht nur die bereits oben erwähnte oft nicht ausreichend vorhandene Verfügbarkeit der Satellitensignale bei auftretenden Abschattungseffekten, sondern in diesem Fall auch die Verwendung eines viel zu ungenauen Empfängers. Ein solches System bietet höchstens Näherungslösungen für den eigenen Standpunkt an.

Die Verbindung von GPS und IMU in Bezug auf dieses Anwendungsgebiet beschreiben unter anderem [Plümer u. a. 2004]. Hierbei werden die registrierten Beschleunigungsmessungen auf signifikante Ausprägungen hin untersucht. Durch die so erfolgte Schritterkennung läßt sich der zurückgelegte Weg dadurch berechnen, dass die Anzahl der Schritte mit einer a-priori vorgegebenen Schrittlänge multipliziert wird. Die daneben benötigten Richtungsinformationen liefert ein Kompass. Durch polares Anhängen an den initialen Standpunkt ergibt sich somit der neue, gesuchte Ort. Die Schritte lassen sich zwar aus dem auftretenden Muster in den Messungen, wie in Abbildung 2.9 visualisiert, erkennen, doch stellt die Bestimmung der Schrittlänge ein Problem dar. Der menschliche Gang ist keines falls homogen, sondern ist von verschiedenen äußeren und persönlichen Umständen beeinflusst. Damit kann auch in diesem Fall lediglich eine bessere Näherungslösung bestimmt werden.

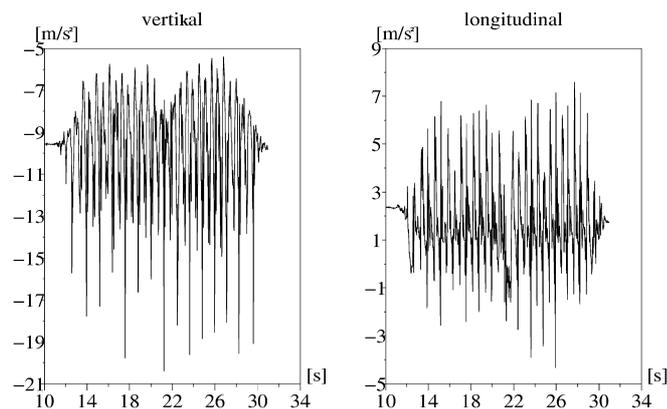


Abbildung 2.9: Beschleunigungen beim menschlichen Gang (Schaubild von S. Wursthorn)

[Ladetto u. Merminod 2002] stellen ein System zur Navigation bestehend aus GPS, IMU und Barometer vor. Dieses sogenannte *Pedestrian Navigation Module*, kurz PNM, erreicht eine absolute Genauigkeit von etwa einem Meter. Auch hier wird die IMU zur Aufdeckung von Schrittmustern verwendet aus denen letztlich der zurückgelegte Weg bestimmt werden kann. Das Barometer hingegen dient der Bestimmung und/oder Verbesserung der Höhenkomponente, indem der gemessene Druck ausgewertet wird. Die gesuchte Höhe lässt sich dabei aus dem Druckunterschied, welcher sich aus dem gemessenen Druck an einem Punkt dessen Höhe bekannt ist und dem Druck am gesuchten Punkt ergibt, bestimmen. Allgemein gilt, dass die Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe sich nach der barometrischen Höhenformel, berechnet. Bei einer anzunehmenden Messgenauigkeit von maximal $0,1hPa$ eines Präzisionsbarometers zeigt sich, dass für eine mittlere Breite die erreichbare Höhen-genauigkeit bei $80cm$ liegt. Dies liefert zwar theoretisch eine recht gute Näherung, ist aber gegenüber äußeren Einflüssen, wie instabile Luftschichten, sehr fehleranfällig und somit für den Einsatz im Gelände nur bedingt anwendbar.

Basierend auf der Verwendung von Kameras zur Navigation, zeigt Abbildung 2.10(a) eine mögliche Anwendung. Hier werden die Muster dazu genutzt die Position des Anwenders zu berechnen. Diese wird anschließend in eine 2D Übersichtskarte, vgl. Abbildung 2.10(b), eingetragen und dem Nutzer eingespiegelt. Damit kann sich der Anwender in einem für ihn unbekanntem Gebäude zurechtfinden. Ein erheblicher Nachteil eines solchen Ansatzes besteht in der Notwendigkeit im Anwendungsgebiet a-priori die Marken platzieren und einmessen zu müssen. Außerdem müssen diese mit einer entsprechenden Dichte verteilt werden um eine kontinuierliche Positionsbestimmung zu sichern. Im Gelände müssen die Marken dauerhaft vor Umwelteinflüssen geschützt werden, ein weiterer Nachteil. Eine solche Vorgehensweise läßt sich somit in Museen oder sonstigen Einrichtungen öffentlichen Interesses verwirklichen. Bei Anwendungen im Gelände jedoch ist die Realisierung mit immensum Aufwand, technischer und logistischer Art, verbunden.

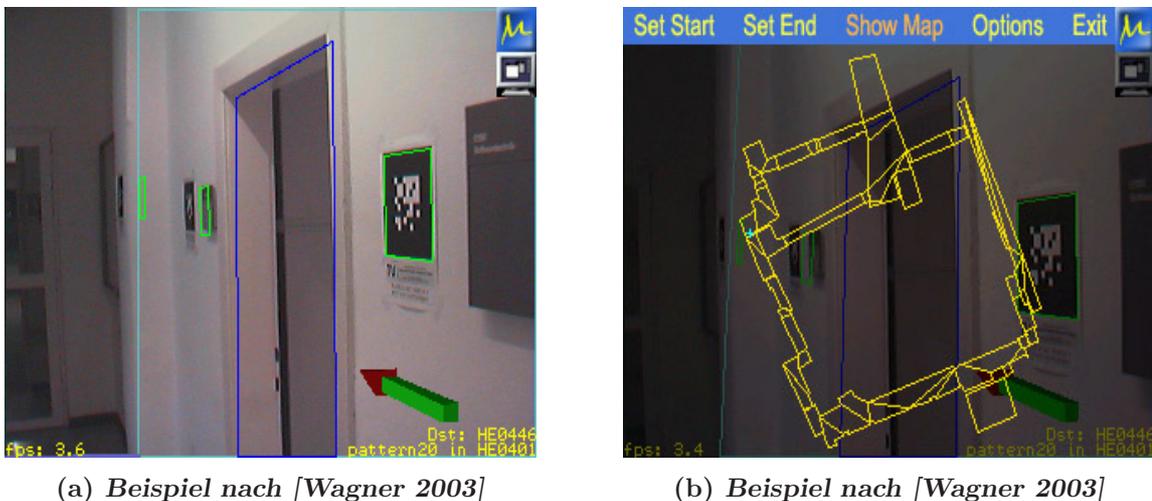
(a) *Beispiel nach [Wagner 2003]*(b) *Beispiel nach [Wagner 2003]*

Abbildung 2.10: Anwendungsbeispiel zu ARToolKit

Um die Nachteile künstlicher Marken zu umgehen, werden stattdessen bereits in der Umgebung des Nutzers vorhandene, markante Punkte und Strukturen verwendet. Die Detektion von natürlichen Landmarken findet sich hauptsächlich im Bereich mobiler, autonomer Roboter, z. B. bei [Mata u. a. 2001], [Yuen u. MacDonald 2002] oder [Madsen u. Andersen 1998], wieder. Diese verwenden signifikante, a-priori bekannte Landmarken wie Beschriftungen von Türschildern. Hierbei handelt es sich um Pixel-, Objekt- oder Strukturbasierte Marken, welche anhand des Kamerabildes wiedererkannt werden und aus denen sich die Position der Trägerplattform bestimmen läßt. Allerdings ist auch hier a-priori Wissen erforderlich. So müssen z. B. die zu verwendenden Marken aufgenommen und für den späteren Abgleich bereitgehalten werden.

Eine Möglichkeit Kameras auch ohne das Anbringen von künstlichen oder die Kenntnis über natürliche Landmarken zu benutzen präsentieren [Libuda u. Kraiss 2004]. Dabei wird auf zuvor festgelegte, beschreibende Annahmen zurückgegriffen um z. B. den Fußboden, Kanten und Türen zu detektieren. Bis zu einem gewissen Grad ist ein solches Vorgehen auch im Gelände denkbar. Jedoch sind hier die anzutreffenden Strukturen weitaus komplexer gestaltet und homogene Oberflächen eher selten.

2.5 Trend

Von besonderem Interesse aus dem Bereich der Satellitennavigation ist wohl das Projekt der ESA (European Space Agency) mit dem Namen GALILEO, [GALILEO 2005]. Basieren wird das für 2008 als voll funktionsfähig geplante System auf 30 Satelliten, die sich in 23222 km Höhe und einer Bahnneigung von 56° gegenüber der Äquatorebene befinden.

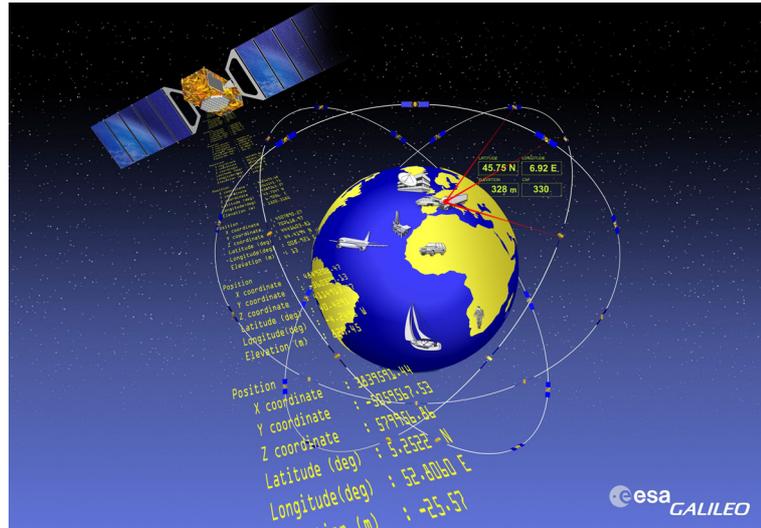


Abbildung 2.11: Aufbau von GALILEO (Quelle: [Wilson 2005]; Image courtesy of ESA)

Durch die festgelegten Bahnparameter wird es im Gegensatz zu GPS möglich sein, selbst polnahe Gebiete mit Satellitensignalen abzudecken. Außerdem wird durch eine zu GPS und GLONASS kompatible Systemgestaltung, die allgemeine Leistungsfähigkeit gesteigert. Durch das Mehrangebot an Satelliten reduziert sich die Wahrscheinlichkeit von Signalverlusten in bebauten Gebieten. Die bereits aus GNSS-1 (Global Navigation Satellite Services-Phase 1) bekannten Erweiterungen werden auch in GNSS-2 (Umsetzung in GALILEO) unterstützt und weiter ausgebaut. Das Ziel ist es, zivilen Nutzern von Satellitennavigation eine Alternative zu den etablierten Systemen zu bieten, welche permanente Verfügbarkeit und unverfälschte Signale nicht garantieren. Aus technischer Sicht werden durch die Entwicklung von GALILEO sowohl neue Verfahren eingeführt als auch bestehende weiterentwickelt. Hierzu zählen unter anderem die Bestimmung der Zeit in den Satelliten, die Signalgenerierung oder die Interoperabilität der Kontrollstationen auf der Erdoberfläche.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) als Standard, weiter gepflegt durch [3GPP 2005], der dritten Mobilfunkgeneration, bietet wie auch schon sein Vorgänger GSM (Global System for Mobile Communications) die Möglichkeit, Personen über ein Handy zu orten und so deren Position zu bestimmen. Damit eröffnen sich dem Nutzer diverse Anwendungsfelder wie Infodienste für Location Based Services (LBS) oder die Verwendung mobiler Routenplaner, welche persönliche Bedürfnisse berücksichtigen. Auch der Einsatz für das Flottenmanagement, wodurch sich Fahrzeuge verfolgen und orten lassen, nimmt gerade bei Unternehmen eine zentrale Position ein.

Eine dritte Entwicklung ist das RFID (Radio Frequency Identification) Verfahren. Die Bestandteile eines RFID Systems, vergleiche Abbildung 2.12, sind zum einen Transponder, die eigentlichen Datenträger, und zum anderen Erfassungsgeräte. Diese erfüllen ihre Aufgaben entweder als reine Lese- oder als Kombination aus Lese- und Schreibeinheit. Die Datenübertragung erfolgt mittels Funk und die Reichweite liegt im Zentimeter- oder Meterbereich [Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2004]. Zum Einsatz kommt diese Technologie bereits heute in Bereichen wie Logistik oder Materialverwaltung. Durchaus vorstellbar, trotz der bislang geringen Reichweite, ist die Verwendung dieser Technik zur Ortung von Personen.

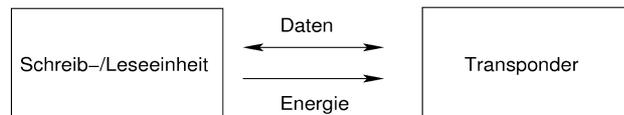


Abbildung 2.12: Prinzipskizze von RFID

Nicht nur die Satelliten- und Funknavigation werden in naher Zukunft weitere Fortschritte machen, sondern auch die Hybridnavigation. In diesem Zusammenhang soll nun AGPS (Assisted GPS) genannt werden [LaMance u. a. 2002]. Wie in Abbildung 2.13 dargestellt, werden dem Nutzer bei einem AGPS System innerhalb eines drahtlosen Netzwerkes Informationen über sichtbare Satelliten und die entsprechenden Ephemeriden übermittelt. Dadurch läßt sich die Position innerhalb weniger Sekunden bestimmen. Der Sichtkontakt zu den Satelliten wird allerdings auch weiterhin notwendig sein. Erst durch die Entwicklung von Empfängern mit erhöhter Eingangs- und Störuneempfindlichkeit oder den Einsatz von GPS Repeatern oder Pseudolites wird die Anwendbarkeit von GPS in Innenräumen, bewaldeten oder besiedelten Gebieten realisiert werden können [Zogg u. Živadinović 2004].

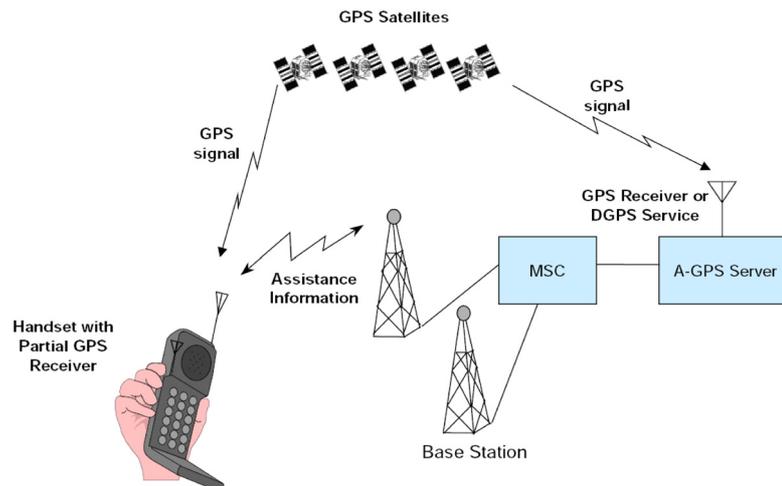


Abbildung 2.13: Prinzipskizze von AGPS (Quelle: [Djuknic u. Richton 2001] ©2001 IEEE)

2.5.1 Einfluss auf die Fußgängernavigation

Bis zur tatsächlichen, zivilen Nutzbarkeit von GALILEO wird wohl noch einige Zeit vergehen. Dies hängt insbesondere damit zusammen, dass die Entwicklung neuer Empfänger notwendig wird. Die damit verbundenen Anschaffungskosten werden für den privaten Nutzer zu Beginn zu hoch sein, weshalb der Einsatz sich zunächst auf Bereiche des Militärs und der Forschung beschränken wird. Trotzdem ist der zu erwartende Mehrwert durch ein zusätzliches System immens. Vor allem die gesteigerte Verfügbarkeit von Satellitensignalen und die verbesserte Abdeckung urbaner Gebiete führt auch bei der Fußgängernavigation zu einer erhöhten Leistungsfähigkeit der Systeme.

Die Weiterentwicklung der Funknavigation stellt eine Möglichkeit dar, den Anwender auf mehrere Meter genau zu orten. Für die Bestimmung der Position bei einem ARS reicht dies allerdings bei weitem nicht aus. Vielmehr lassen sich hierdurch LBS initiieren, vorausgesetzt die notwendige Netzabdeckung ist entsprechend gegeben.

Trotz aller Neuentwicklungen wird es auch in Zukunft unumgänglich sein verschiedene Verfahren zu kombinieren. Jedes System besitzt weiterhin spezifische Vor- und Nachteile. Diese müssen je nach Anwendung analysiert und durch die Hinzunahme anderer Komponenten verstärkt bzw. abgeschwächt werden.

Kapitel 3

Informationsgewinnung aus Bildern

Das Ziel dieses Kapitels ist es, Methoden und Abläufe vorzustellen, mit denen es möglich ist, relevante Informationen aus Bildern zu extrahieren. Dafür werden grundlegende Operationen der Digitalen Bildverarbeitung beschrieben. Die Ausführungen beschränken sich dabei auf diejenigen Methoden, welche in der verwendeten Graphikbibliothek implementiert sind. Es werden Techniken erläutert, welche zur Bildverbesserung und zur rechnergestützten Auswertung der durch die Verbesserung erhaltenen Ergebnisse eingesetzt werden können. Die Vorstellung unterschiedlicher Matchingmethoden bildet den Abschluss dieses Grundlagenkapitels.

Die Sammlung von Bildverbesserungsoperatoren, Auswerteverfahren und Matchingmethoden dient als Fundus der selbstentwickelten Verarbeitungskette zur Unterstützung der Navigationslösung beschrieben in Kapitel 4. Auf Erläuterungen bezüglich der Wahl eines entsprechenden Sensors zur Bildaufnahme wird jedoch bewusst verzichtet, da in dieser Arbeit das Hauptaugenmerk auf die softwaretechnische Realisierung gelegt wurde.

Zunächst wird jedoch eine kurze Einführung gegeben, welche dazu dient, die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Begriffe präziser zu definieren und gegeneinander abzugrenzen.

3.1 Definitionen

Nach [DIN 1997] wird Digitale Bildverarbeitung wie folgt definiert:

*Die digitale **Bildverarbeitung** ist die Gesamtheit der Verfahren, durch die ein digitales Bild rechnerisch in ein verändertes digitales Bild überführt wird. Die Veränderung kann sich auf die geometrischen und/oder die radiometrischen Bildeigenschaften beziehen oder das Ergebnis einer Klassifizierung sein.*

Im Kontext dieser Arbeit bezieht sich die Digitale Bildverarbeitung auf den Bereich der radiometrischen Verarbeitung eines Eingabebildes, da grundsätzlich die radiometrischen Eigenschaften zur Verarbeitung herangezogen werden. Als Ergebnis erhält man ein Ausgabebild, dessen geometrische Eigenschaften mit denen des Eingabebildes übereinstimmen.

Weiterhin sei in diesem Zusammenhang der Begriff *Bildverbesserung* erwähnt. Nach [DIN 1996] lautet dessen Definition wie folgt:

***Bildverbesserung** ist eine Art der Bildverarbeitung, durch die anschließende Auswertevorgänge einfacher oder zuverlässiger werden.*

Da in dieser Arbeit der Begriff *Filterung* von zentraler Bedeutung sein wird, sei an dieser Stelle auch dessen Definition, ebenfalls nach [DIN 1997], dargestellt.

*Die **Filterung** ist ein Vorgang, durch den Bildstrukturen verändert werden, die sich nicht in den Grauwerten einzelner Pixel, sondern in den Grauwertrelationen benachbarter Pixel (d. h. in den Ortsfrequenzen) ausdrücken.*

Die Auswertevorgänge erfolgen visuell und/oder rechnergestützt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die rechnergestützte Auswertung zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich im Speziellen um die Merkmalsextraktion. Laut [DIN 1997] ist ein *Merkmal* folgendermaßen bestimmt:

***Merkmale** sind alle gemessenen oder aus Meßwerten abgeleiteten Größen, die zur Unterscheidung der Objekte einer Klasse von Objekten anderer Klassen herangezogen werden können.*

Ausgehend von dieser grundsätzlichen Trennung der unterschiedlichen Begriffe, werden nun im folgenden Abschnitt entsprechende Schritte und/oder Methoden näher betrachtet, die in Verbindung zur Bildverarbeitung und den für die Arbeit relevanten Teilaspekten stehen.

3.2 Digitale Bildverarbeitung

Die Digitale Bildverarbeitung findet überall dort Anwendung, wo Eingabebilder in Ausgabebilder transformiert werden sollen. Sie genügen gewissen Qualitätsansprüchen nicht. Sie weisen zum Beispiel ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis auf. Außerdem sollen bestimmte Merkmale, wie zum Beispiel Landmarken, Ecken oder Kanten und/oder Objekte, für die Klassifizierung extrahiert werden. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig. Sie erstrecken sich von der Industrie über die Medizin und die Physik bis hin zur Archäologie und den Geowissenschaften [Gonzalez u. Woods 1993].

Bildverarbeitung, ob analog oder digital, lässt sich unterteilen in die geometrische und die radiometrische Verarbeitung. Zentrale Begriffe bei der geometrischen Verarbeitung sind die folgenden:

- Geometrische Bildtransformation,
- Entzerrung,
- Resampling oder auch
- Mosaikbildung.

In den Bereich der radiometrischen Verarbeitung fallen Begriffe wie

- Radiometrische Bildtransformation,
- Bildrestaurierung,
- Bildverbesserung oder
- Filterung.

Insbesondere der Zusammenhang zwischen Bildverbesserung und Filterung wird in dieser Arbeit zentrale Bedeutung besitzen. Daher sollen diese beiden Begriffe und deren Beziehung zueinander nachfolgend genauer betrachtet werden.

3.2.1 Bildverbesserung

Die Bildverbesserung hat die Aufgabe, gewünschte, spezielle Bildmerkmale zu betonen, zu schärfen, sowie Fehler, die bei der Aufzeichnung entstanden sind, zu entfernen. Es soll also die Qualität eines Bildes bei möglichst geringem Informationsverlust gesteigert werden. Sie dient zur Vorbereitung der Merkmalsextraktion und macht diese erst möglich. Ihr wird außerdem die Filterung zugeordnet. Zu unterscheiden gilt es hierbei insbesondere zwischen den beiden folgenden Arten von Filtern

- **Hochpassfilter:** Vermindert (Verstärkt) niedrige (hohe) Ortsfrequenzen in Bildern. Es werden Details betont.
- **Tiefpassfilter:** Vermindert (Verstärkt) hohe (niedrige) Ortsfrequenzen in Bildern. Es werden Details geglättet.

Ein weiterer wichtiger Begriff, der in Verbindung mit Bildverbesserung häufig gebraucht wird, ist *Faltung*. Die Faltung von diskreten Vorgängen wird nach [Bronstein u. a. 1999] wie folgt definiert:

$$f_n * g_n = \sum_{\nu=0}^n f_\nu g_{n-\nu} \quad (3.1)$$

Das Symbol „*“ steht dabei für den Operator. Übertragen auf die Digitale Bildverarbeitung ergibt sich Gleichung 3.1 zu

$$(f * g)_{n,m} = \sum_{\nu=-\infty}^{+\infty} \sum_{\mu=-\infty}^{+\infty} f_{\nu,\mu} g_{n-\nu,m-\mu} \quad (3.2)$$

f beschreibt hierbei den Faltungskern und g das Eingabebild.

Nachfolgend werden nun verschiedene Filtermethoden vorgestellt und anhand von Beispielen konkretisiert.

1. Punktoperationen

Durch Punktoperationen ändern sich die Größe, die Geometrie oder lokale Bildstrukturen nicht, sondern lediglich die Werte einzelner Bildelemente (vgl. [Burger

u. Burge 2005]). Bei solchen Operationen hängt der neue Wert $I'(u, v)$ eines Bildelementes im Ausgabebild nur vom ursprünglichen $I(u, v)$ an derselben Position im Eingabebild ab. $I'(u, v)$ ist somit unabhängig von Werten anderer, insbesondere von Nachbarpixeln.

Ein typisches Beispiel für eine Punktoperation ist das Schwellwertverfahren.

- **Schwellwertverfahren**

Hierbei wird jedem Bildelement, entsprechend seiner Ausprägung, ein a-priori definierter Wert w_0 oder w_1 , in Abhängigkeit vom gewählten Schwellwert (*engl.*: threshold) T , zugewiesen und so die ursprünglichen Bildwerte in zwei Klassen geteilt. Dies geschieht durch die Vorschrift

$$I'(u, v) = \begin{cases} w_0 & \text{für } I(u, v) > T \\ w_1 & \text{sonst} \end{cases} .$$

Häufig wird dieses Verfahren dafür angewendet, will man aus dem Ausgangsbild, Grauwert- oder Farbbild, ein Binärbild erzeugen. Abbildung 3.1 zeigt als Beispiel ein Grauwertbild und das daraus gerechnete Binärbild. Dabei wird lediglich jeder einzelne Grauwert des Eingabebildes berücksichtigt. Mögliche Störpixel oder Relationen werden bei der Ermittlung des Ausgabebildes nicht mit einbezogen. Dies zeigt sich in Abbildung 3.1 anhand der Fenster, der Tür oder auch der Hecke. Deren Strukturen sind in Abbildung 3.1(a), dem Eingabebild, wahrnehmbar. Im Ausgabebild, Abbildung 3.1(b), hingegen nicht mehr. Dort sind lediglich einige wenige Merkmale erhalten geblieben, die sich zum Teil aufgrund der Beleuchtungssituation hervorheben.



(a) *Eingabebild*

(b) *Ausgabebild*

Abbildung 3.1: Beispiel für die Anwendung des Thresholding ($t = 85$)

Dieses Verfahren lässt sich durch die Verwendung eines lokal angepassten Schwellwertes (*engl.*: adaptive threshold) verbessern. Es wird davon ausgegangen, dass benachbarte Pixel hinsichtlich ihrer Ausleuchtung ähnlich sind und werden deshalb für die Berechnung des Schwellwertes berücksichtigt. Eine unkomplizierte Möglichkeit diesen zu berechnen bieten das arithmetische Mittel oder die Gauß-Funktion. Beim arithmetischen Mittel wird dafür die Größe eines qua-

dratischen, das zu untersuchende Bildelement umschließenden, Fensters definiert, an dem die Mittelwertberechnung ansetzt. Bei der Gauß-Funktion wird ebenfalls ein Fenster definiert, jedoch wird der Schwellwert aus gewichteten Bildwerten berechnet. Damit werden Nachbarschaftsverhältnisse zwar berücksichtigt, kleine Unterschiede der Bildelemente jedoch stärker bei der Berechnung beachtet.

2. Lineare Filter

Weit verbreitete Techniken zur Bildverbesserung sind vor allem Lineare Filter der Form

$$I'(u, v) = \sum_{(i,j) \in R} I(u+i, v+j)H(i, j)$$

mit R als Beschreibung der Filterregion. $H(i, j)$ definiert den Faltungskern f aus Gleichung 3.2 in der Form, dass lediglich die von 0 verschiedenen Werte dargestellt werden. Durch die Variation von $H(i, j)$ lassen sich eine Vielzahl verschiedener Filter mit unterschiedlichsten Verhalten definieren. So repräsentieren $H_{Tiefpass}$ und $H_{Hochpass}$ zwei Beispiele für einen Tief- bzw. Hochpassfilter.

$$H_{Tiefpass} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad H_{Hochpass} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 12 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Der entscheidende Nachteil bei den Tiefpassfiltern ist, dass es sich nicht vermeiden lässt, dass auch beabsichtigte Bildstrukturen wie Punkte, Linien und Kanten verwischt werden und somit die Bildqualität im Ganzen reduziert wird. Da sie aber trotzdem in gewissen Bereichen zum Einsatz kommen, sollen nachfolgend zwei Vertreter kurz beschrieben werden.

- **Mittelwert- oder Box-Filter**

Hierbei wird die wohl einfachste Ausprägung des Faltungskerns in der Form

$$H(i, j) = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

im Beispiel als 3×3 Matrix dargestellt, angewandt.

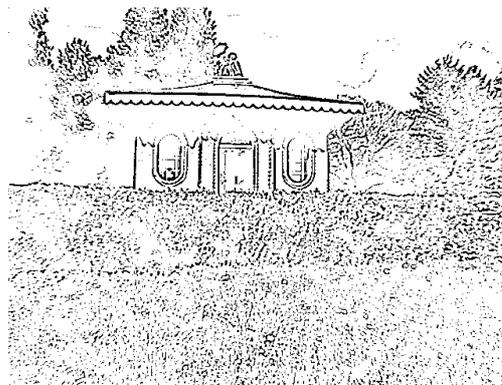
Das (gleitende²) Mittelwertfilter, auch mit größeren Matrizen vorstellbar, bewirkt eine Glättung der Grauwerte. Das Prinzip und ein resultierendes Binärbild werden in Abbildung 3.2 gezeigt.

Eine Gleichgewichtung aller verwendeten Bildelemente bei der Berechnung ist allerdings wenig plausibel, da Störungen oder Fehler in der Nachbarschaft des zentralen Pixels den gerechneten Wert zu sehr verfälschen.

²Es werden für die Berechnung sowohl „aktuelle“ als auch bereits verwendete Werte genommen und beim Einlesen neuer Werte die „ältesten“ vernachlässigt.

127	123	126	131	134	138	141	140
120	119	125	132	133	135	138	143
118	121	123	127	129	131	136	138
133	137	131	130	132	150	140	137
117	116	120	121	122	124	131	130
121	126	132	140	147	149	146	144
123	127	132	131	133	133	137	139
126	133	129	132	131	130	138	140

(a) 3×3 Mittelwertfilter-Matrix über einem 8×8 Bildausschnitt



(b) Mittelwert gefiltertes Binärbild

Abbildung 3.2: Gleitendes Mittelwertfilter

- **Gaußfilter**

Der entsprechenden Faltungskern lässt sich gemäß der Funktion

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

berechnen. Ein Beispiel für die Anwendung eines Gaußfilters mit einer Matrix der Größe 3×3 , zeigt Abbildung 3.3. Dabei erhält das mittlere Bildelement das maximale Gewicht, während die übrigen Grauwerte mit steigender Entfernung mit einem entsprechend geringeren Faktor multipliziert werden. Dadurch fließen im Gegensatz zum Mittelwertfilter, Ausreißer in der Nachbarschaft weniger stark in die Berechnung ein.

- **Sobelfilter**

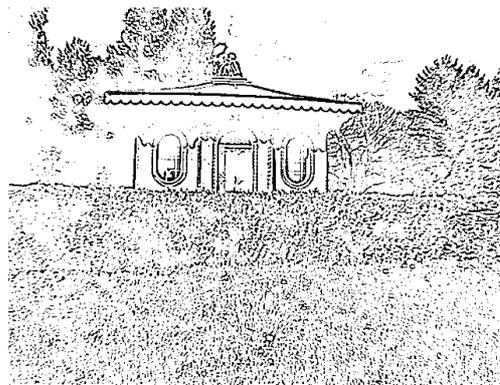
Dieser verwendet die beiden Faltungskerne

$$H_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad H_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Durch deren Einsatz wird es möglich, horizontale und vertikale Kanten zu detektieren.

127	123	126	131	134	138	141	140
120	119	125	132	133	135	138	143
118	121	123	127	129	131	136	138
133	137	131	130	132	150	140	137
117	116	120	121	122	124	131	130
121	126	132	140	147	149	146	144
123	127	132	131	133	133	137	139
126	133	129	132	131	130	138	140

(a) 3×3 Gaußfilter-Matrix über einem 8×8 Bildausschnitt



(b) Gauß gefiltertes Binärbild

Abbildung 3.3: Gauß Filter

- **Laplacefilter**

Das Laplacefilter ist definiert über die Summe der zweiten partiellen Ableitungen einer Funktion. Bei der Anwendung auf 2D-kartesische Koordinaten, ergibt er sich nach [Bronstein u. a. 1999] zu:

$$\Delta g = \nabla^2 g = \sum_{k=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial x_k^2}.$$

Hieraus ergibt sich beispielsweise mit den beiden Faltungskerne H_x und H_y

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x_1^2} \approx H_x = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 g}{\partial x_2^2} \approx H_y = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix},$$

das zweidimensionale Laplace Filter in der Form:

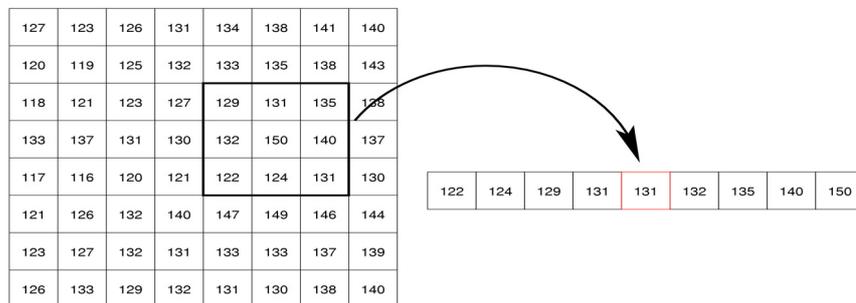
$$H = H_x + H_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Nichtlineare Filter

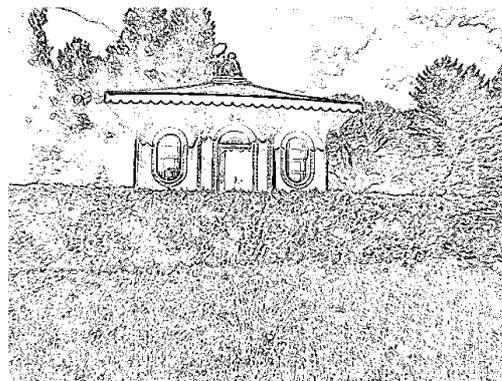
Neben den Linearen Filtern existieren die Nichtlinearen Filter. Auch diese berechnen neue Pixelwerte $I'(u, v)$ für ein Eingabebild bezüglich einer Region im R . Allerdings steht das Ergebnis, im Gegensatz zu den Linearen Filtern, in keinem linearen Zusammenhang zur Eingabe. Von erweitertem Interesse ist in diesem Zusammenhang das Medianfilter.

- **Medianfilter**

Durch das Medianfilter werden insbesondere Störungen, also Ausreißer, auf simple Art und Weise eliminiert und gleichzeitig Strukturen nur geringfügig verändert. Es besitzt gegenüber dem Mittelwertfilter den Vorteil, dass Grauwertübergänge besser erhalten bleiben und keine neuen natürlichen Zahlen entstehen, solange der Faltungskern eine ungerade Größe n besitzt. Die Bestimmung des Median bei einem Faltungskern mit ungerader Seitenlänge und ein Beispiel nach dessen Verwendung zeigt Abbildung 3.4. Da sich bei einer geraden Kantenlänge der Median aus dem arithmetischen Mittel der Werte an $\frac{n}{2}$ -ter und $(\frac{n}{2} + 1)$ -ter Stelle berechnet, entstehen rationale Zahlen, was es bei einem solchen Filter eigentlich zu vermeiden gilt. Deshalb ist darauf zu achten, dass die Kanten stets ungerade Beträge aufweisen um solche Effekte zu umgehen.



(a) 3×3 Medianfilter-Matrix über einem 8×8 Bildausschnitt



(b) Median gefiltertes Binärbild

Abbildung 3.4: Median Filter

4. Bilaterales Filter

Es existieren verschiedene Filter, welche die Vorteile Linearer und Nichtlinearer Filter verbinden, um eine kantenerhaltende Glättung durchzuführen (einen Vergleich dieser präsentieren [Abramson u. Schowengerdt 1993]). Eines davon ist das Bilaterale Filter, welches in der verwendeten Graphikbibliothek enthalten ist. Es basiert auf den Untersuchungen von [Tomasi u. Manduchi 1998] und besteht aus zwei Komponenten, welche zum einen das Bild glätten, zum anderen aber auch vorhandene Kanten erhalten. Die beiden Elemente kombinieren *domain and range filtering*, wobei die Gewichtung entsprechend der Ähnlichkeit und der räumlichen Nähe der Pixel geschieht. Die mathematische Repräsentation für das Ausgabebild $h(x)$ lautet:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi$$

mit

$$k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi.$$

Die Funktion c besitzt ähnliche Eigenschaften wie das Gaußfilter und berücksichtigt die räumlichen Entfernungen. s hingegen berücksichtigt die Verteilung der Grauwerte und verteilt die Koeffizienten entsprechend. Ein Beispiel für die Anwendung eines Bilateralen Filters zeigt Abbildung 3.5.

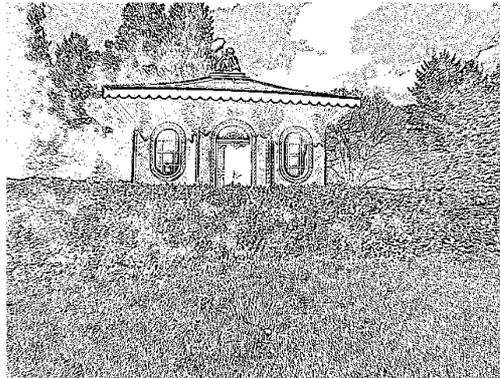


Abbildung 3.5: Bilateral gefiltertes Binärbild

5. Gauß- und Laplace-Pyramiden

Entsprechend der Beschreibung von [Burt u. Adelson 1983] werden die gesuchten Bilder mittels

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{l-1}(2i + m, 2j + n)$$

erzeugt. Der Faltungskern wird dabei durch die Gewichtsfunktion w beschrieben, welche eine (angenäherte) Gauß'sche Glockenkurve beschreibt. Vom Ergebnisbild werden immer nur die geraden Bildelemente gerechnet, wodurch eine flächenmäßige

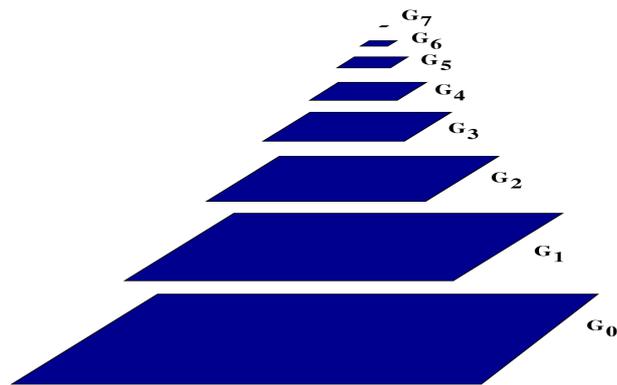


Abbildung 3.6: Schema einer Gauß Pyramide

Reduktion des Eingangsbildes um den Faktor 4 entsteht, vergleiche Abbildung 3.6. Dieser Vorgang wird nun so lange fortgesetzt, bis das Bild den minimal möglichen Flächeninhalt erreicht hat. Man erhält die sogenannte Gauß Pyramide. Die einzelnen Stufen unterscheiden sich durch die in ihnen enthaltenen Frequenzen. Durch Tiefpassfilterung enthält die erste Stufe das halbe Spektrum des Originalbildes, die zweite wiederum die Hälfte der ersten, usw. Einen entsprechenden Schritt vom Ausgangsbild zum Bild der ersten Ebene ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

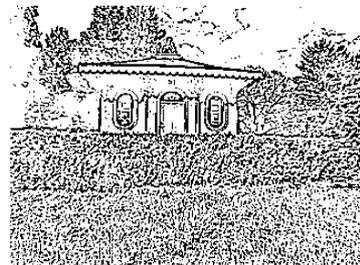
(a) *Eingabebild (0. Ebene)*(b) *1. Ebene*(c) *Binärbild der 1. Ebene*

Abbildung 3.7: 1. Schritt der Gauß Pyramide

Im Gegensatz dazu speichert die Laplace-Pyramide Differenzen zwischen zwei Ebenen der Gauß-Pyramide gemäß

$$L_n(i, j) = G_l(i, j) - G_{l-1}(i, j).$$

Sie repräsentiert somit eine Folge von hochpaßgefilterten Bildern.

3.2.2 Verfahren zur Merkmalsextraktion

Signifikante Grauwertübergänge oder veränderte Intensitäten bilden Regionen von gesteigertem Interesse in einem Bild. An solchen Stellen lassen sich Kanten und Konturen erkennen, welche einen erheblichen Informationsgewinn liefern können.

1. Kantendetektion

In Bildern werden Kanten durch signifikante Grauwertunterschiede auf kleinstem Raum und entlang einer bestimmten Richtung repräsentiert. Um diese zu finden, werden spezielle Operatoren benötigt. Einige von diesen werden nachstehend erläutert.

- **Sobel Operator**

Mit den beiden Faltungskernen H_x und H_y eines Sobelfilters und den Pixelwerten I des Eingabebildes, kann der Betrag des Gradienten $|G|$ nach

$$|G| = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad \text{mit} \quad D_x = H_x * I, \quad D_y = H_y * I$$

bestimmt werden. Dieser gibt Auskunft über die Kantenstärke. Durch

$$\Theta = \arctan\left(\frac{D_y}{D_x}\right)$$

lässt sich ein Maß für die Kantenrichtung darstellen.

Ob sich nun ein Punkt auf einer Kante befindet oder nicht wird schließlich mit Hilfe von Schwellwerten gemäß

$$K = \begin{cases} 1 & \text{für } |G| > T \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

bestimmt.

- **Laplace Operator**

Basierend auf dem Faltungskern H eines Laplacefilters, wird dieser Operator häufig zur Kantenschärfung eingesetzt. Dafür werden die Elemente des Ausgabebildes wie folgt berechnet:

$$I' = I - w \cdot (H * I).$$

Der Faktor w bestimmt hierbei die Stärke der Schärfung, [Burger u. Burge 2005].

- **Canny Operator**

Dieser Algorithmus, nach [Canny 1983], besteht aus den folgenden 4 Schritten:

- (a) Image smoothing: Gauß-Filterung des Eingangsbildes
- (b) Differentiation: Berechnung des Gradienten
- (c) Non-maximum Suppression: Bilden der Kanten aus Pixeln mit maximalen Gradienten
- (d) Edge Thresholding: Werte über oberer Grenze werden akzeptiert, Werte unterhalb unterer Schranke abgelehnt und Werte dazwischen akzeptiert, falls gesicherte Kantenpixel in der Nähe sind.



(a) *Eingabebild*



(b) *Ausgabebild bei $\sigma = 1$*



(c) *Ausgabebild bei $\sigma = 3$*

Abbildung 3.8: Beispiel nach [Ma 1996] für den Canny Operator

Abbildung 3.8 demonstriert ein Beispiel für die Kantendetektion. Hierbei werden sämtlich Kanten entsprechend der gesetzten Parameter zur Berechnung gefunden. Besonderen Einfluss auf das Ergebnis hat zum einen die gewählte Standardabweichung σ bei der Berechnung des Faltungskerns zur Gauß-Filterung. Mit wachsendem σ verringert sich sowohl der Einfluss von Fehlern als auch die Möglichkeit, feine Strukturen zu erkennen. Und zum anderen spielt

die Wahl des oberen und unteren Schwellwertes eine Rolle bei der Kantendetektion. Wird der obere Wert zu niedrig gesetzt, so erscheinen im Ausgabebild zu viele Artefakte. Bei einem zu hohen unteren Wert hingegen werden mit Rauschen behaftete Kanten im Ausgabebild verkürzt dargestellt. Somit ist es notwendig die beiden Grenzwerte so zu wählen, dass sowohl Rauschen unterdrückt wird, als auch Details erhalten bleiben.

Um das Ergebnis nun zu verfeinern, können die Kanten weiter untersucht werden. Das Ziel welches hierbei verfolgt wird ist, Kanten mit einer gewissen Ausprägung, z.B. Betrag und Richtung, zu erkennen. Dies gelingt zum Beispiel durch die Verwendung der *Hough Transformation*.

2. Hough Transformation

Diese Methode, nach [Duda u. Hart 1972], dient dazu parametrisierbare Formen zu erkennen. Dabei wird jedem Punkt im Bildraum eine entsprechende Repräsentation im durch r und Θ aufgespannten Parameterraum, auch Hough-Raum genannt, zugewiesen. Bestimmt wird die Darstellung einer Geraden im Bildraum über deren Darstellung im Parameterraum gemäß

$$r = x \cos \Theta + y \sin \Theta \quad , \text{ mit } \Theta \in [0; \pi] . \quad (3.3)$$

Abbildung 3.9 zeigt hierfür ein Beispiel. Die Punkte P_1 und P_2 im Bildraum $((x, y))$ werden im Hough-Raum $((r, \Theta))$ durch eine endliche Anzahl von Punkten nach Gleichung 3.3 repräsentiert. Der Schnittpunkt der beiden Kurven gibt die eindeutigen Parameter für die gemeinsame Gerade im Bildraum wieder. Verallgemeinert gesprochen, gibt die Anzahl der sich in einem Punkt im Parameterraum schneidenden Kurven an, wieviele Punkte im Bildraum auf der entsprechenden Geraden liegen.

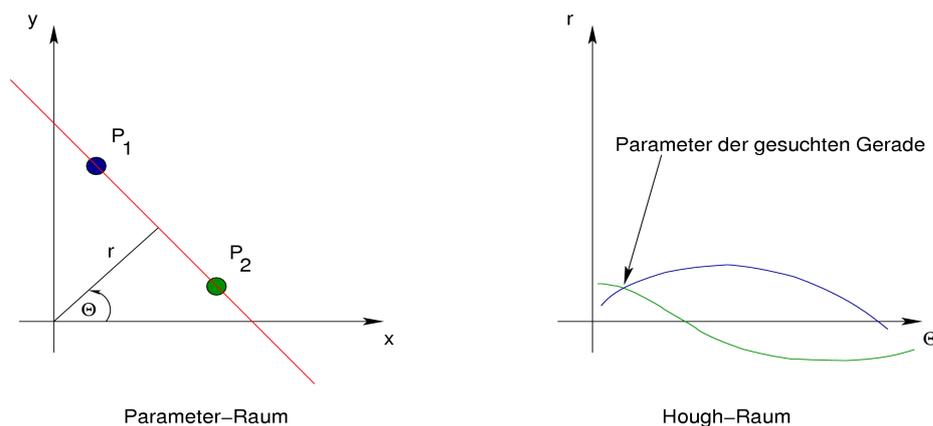


Abbildung 3.9: Beispiel für die Hough-Transformation

Ein möglicher weiterer Arbeitsschritt besteht darin, extrahierte Merkmale in 4D-Bildfolgen zum Zwecke der Bewegungskdetektion oder der Stereobildauswertung zu verfolgen. Hierfür werden Bildpunkte oder Strukturen gesucht, die für die Berechnung eines solchen Verschiebungsvektorfeldes besonders geeignet sind.

3.3 Bildvergleich („Matching“)

Die Wiedererkennung extrahierter Informationen eines Bildes in anderen ist eine wichtige Aufgabe in der Bildverarbeitung. Sie dient dazu, die innere Orientierung herzustellen, die relative Orientierung der Bilder zu bestimmen oder Szenen zu erfassen. Außerdem dient sie der Triangulation von Luftbildern und der Erstellung von Digitalen Geländemodellen [Heipke 1996]. Hierzu kommen unterschiedliche Techniken zum Einsatz. Einteilen lassen sich diese in Raster- und Merkmalbasierte Algorithmen sowie Algorithmen, die den räumlichen Bezug von Objekten berücksichtigen [Rottensteiner 2001].

1. Rasterbasiertes Matching

Die hier verwendeten Verfahren benutzen die Grauwerte der Bilder und Funktionen zu deren Beschreibung. Ziel ist es, eine *Mapping Function* zwischen dem Referenz- und dem Suchbild zu bestimmen. Dies geschieht durch den Vergleich der Grauwerte zweier Bilder, zum Beispiel mit Hilfe der Kreuzkorrelation.

Bei der Kreuzkorrelation wird das Referenzbild über das Suchbild hinweg bewegt und ein Korrelationskoeffizient berechnet. Dieser wird dann hinsichtlich eines Schwellwertes verglichen, wodurch weitere Aussagen möglich werden.

2. Merkmalbasiertes Matching

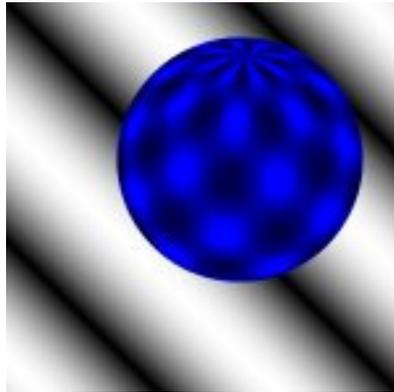
Anstatt der Grauwerte setzen diese Verfahren Informationen ein, welche aus Algorithmen zur Merkmalsextraktion gewonnen werden. Diese können zum Beispiel Kanten, Ecken, Kurven oder Linien sein, abhängig vom zu untersuchenden Inhalt des Bildes. Ziel ist es, homologe Eigenschaften, also die gleichen Merkmale, in zwei oder mehreren Bildern zu finden. Zur Reduktion von Fehlern sollten zusätzliche Randbedingungen definiert werden. Hierzu zählen Epipolarbedingungen, Näherungslösungen für die Objekte, Nachbarschafts- oder Grauwertidentitäten.

3. Relationales Matching

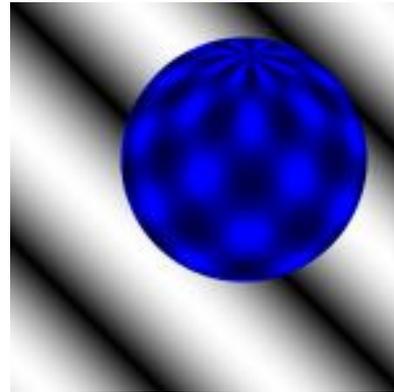
Diese Technik nutzt bestehende, topologische Beziehungen der Objekte untereinander. Ein solches Verfahren ist unabhängig von der gewählten Perspektive bei der Aufnahme und kann demzufolge in vielen Fällen eingesetzt werden. Allerdings kann der aufzubringende Rechenaufwand durch den Einsatz von Suchbäumen schnell recht hoch werden.

4. Der optische Fluss

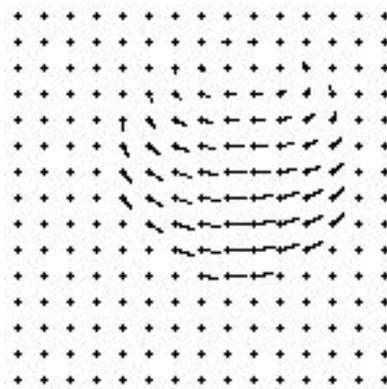
Einen ganz anderen Ansatz bietet die permanente Verfolgung von detektierten Objekten in Bildfolgen an. Eine Bildfolge repräsentiert eine Sequenz von endlich vielen Einzelbildern die logisch aufeinander aufbauen. Beim optischen Fluss wird im Zweidimensionalen für jedes Pixel bestimmt, wie sich seine Lage zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten t_1 und t_2 verändert hat. Analog hierzu wird im Dreidimensionalen die Lageänderung eines jeden Voxels bestimmt. Hieraus lassen sich ganze Bewegungsvektorfelder erstellen und einzelne Bilder zu einem beliebigen Zeitpunkt t_i durch Verschiebung von Bildelementen reproduzieren. [Lucas u. Kanade 1981] oder [Horn u. Schunck 1981] liefern bekannte Ansätze zur Berechnung des optischen Flusses.



(a) Aufnahme zum Zeitpunkt t_1



(b) Aufnahme zum Zeitpunkt t_2



(c) Bewegungsvektoren

Abbildung 3.10: Beispiel für den optischen Fluss nach [McCane 2000]

Die Abbildungen 3.10(a) und 3.10(b) stellen zwei Bilder zu unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten dar. Die Orientierung der Kugel ist zum Zeitpunkt t_2 gegenüber der ersten Aufnahme entgegen dem Uhrzeigersinn verdreht. Wie sich dies nun mit Hilfe von Flussvektoren darstellen lässt, zeigt Abbildung 3.10(c).

Kapitel 4

Neuer Ansatz zur Hybridnavigation

Dieses Kapitel beschreibt die Bestandteile des in dieser Arbeit implementierten Ansatzes einer Hybridnavigation für Anwendungen im Gelände. Außerdem werden die eingesetzten Verfahren und Berechnungsmethoden sowie deren Implementierungen vorgestellt. Abschließend wird dargestellt wie die einzelnen Komponenten zusammenarbeiten und wie sie sich zu einem Gesamtsystem ergänzen. Zunächst wird jedoch das entwickelte System vorgestellt.

4.1 Das System im Überblick

Die einzelnen Komponenten des ARS zur Verfolgung der Position und Orientierung, die Kamera, Schnittstellenverteiler sowie die Stromversorgung werden, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, an einer Rückentrage befestigt. Für die mitzuführende Recheneinheit besteht die Möglichkeit, diese im ebenfalls montierten Aluminiumkoffer zu verstauen.

Bei der Auswahl der Komponenten zur Navigation steht die mit den Sensoren erreichbare Genauigkeit an erster Stelle. Der Grund hierfür ist, dass die Qualität der Visualisierung in einem ARS abhängig davon ist, mit welcher Genauigkeit die Position der Plattform bekannt ist. Je genauer der eigene Standpunkt bestimmbar und somit in Echtzeit bekannt ist, desto besser gelingt es die künstlichen Objekte in die Umgebung einzubetten. Weniger Beachtung findet demzufolge die Portabilität, da ohnehin davon auszugehen ist, dass in naher Zukunft die entsprechenden Sensoren kleiner und damit auch handlicher werden.

4.1.1 Abgrenzung zu anderen AR Systemen

Der oben beschriebene Aufbau ähnelt sehr stark den bereits in Abschnitt 2.4.7 beschriebenen Systemen zur Fußgängernavigation. Gerade für die Navigation im Gelände wird auf konventionelle Methoden und Sensoren zurückgegriffen. Dies sind zur Bestimmung der Position insbesondere GPS Empfänger, sowie Inertialsensoren zur Messung der Orientierung im Raum. Deshalb unterscheiden sich die Systeme lediglich dadurch, dass Sensoren unterschiedlicher Hersteller verwendet werden.

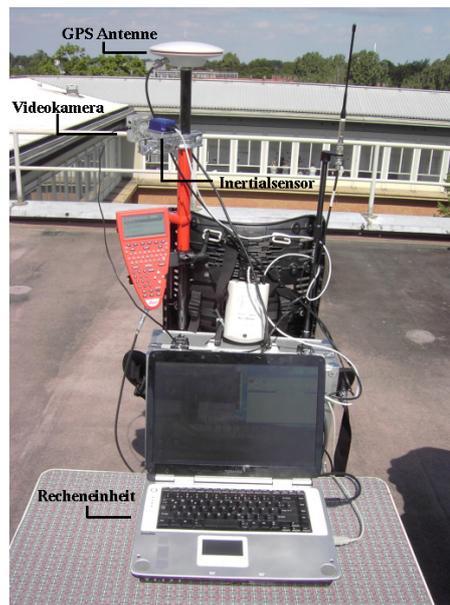


Abbildung 4.1: Das entwickelte Gesamtsystem

Allerdings erfüllen die beteiligten Komponenten in dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten System noch zusätzliche Aufgaben. Welche das sind und wie sich ihr Zusammenspiel gestaltet, beschreiben die nachfolgenden Abschnitte.

4.2 Die GPS-Einheit

Das GPS bildet die zentrale Komponente des entwickelten Systems bezüglich der Navigation. Es besteht aus einer Referenzstation, einem GPS-Empfänger der Firma Trimble ([TRIMBLE 2005]) Typ 4800 und einem Rover der Firma Leica ([LEICA GEOSYSTEMS 2005]) vom Typ SR530. Bei beiden handelt es sich um Zweifrequenzempfänger. Die Referenzstation sendet den erzeugten Korrekturdatensatz einschließlich der Trägerphasen. Bei diesem Verfahren spricht man von RTK (*für*: Real Time Kinematic) oder PDGPS (*für*: Precise DGPS). Dadurch sind zumindest was die Genauigkeitsanforderungen bezüglich der Position bei einem mobilen ARS in günstigem Gelände betrifft, die geforderten Voraussetzungen erfüllt, was bei vergleichbaren Systemen durch die Verwendung von Einfrequenzempfängern nicht der Fall ist.

4.2.1 Auslesen der Daten in Echtzeit

Der GPS Empfänger berechnet intern aus den empfangenen Signalen seine Position. Für sich anschließende Verarbeitungsschritte in Echtzeit ist es notwendig, eine Lösung zu finden die es erlaubt, die Position nicht nur am Display der Steuereinheit anzeigen zu lassen, sondern auch auszulesen und mittels der Recheneinheit des Systems zu untersuchen.

Ein möglicher Weg hierfür ist, die notwendigen Informationen über die RS232 (serielle) Schnittstelle abzurufen. Ein in der Seefahrt oder bei der Verwendung von sogenannten *GPS Mäusen*, eine von Privatanwendern häufig eingesetzte Form von miniaturisierten GPS Empfängern, weit verbreitetes Format ist der so genannte NMEA0183 Interface Standard der NMEA (*für*: National Marine Electronics Association). Dieses soll vom entsprechenden Gerät mit einer Datenrate von 4800 baud (etwa 600 bytes/Sekunde) ausgegeben werden. Die letzte Version (3.01) dieses Formats wurde im Januar 2002 veröffentlicht und ist in den meisten Standard GPS Empfängern, im Gegensatz zu seinem Nachfolger NMEA2002, implementiert. Weiterführende Informationen finden sich unter [NMEA 2005].

Ein wesentlicher Vorteil der durch die Verwendung des NMEA Standards als Ausleseformat entsteht ist, dass unterschiedliche GPS Empfänger als Rover an einem Auslesegerät beliebig gegeneinander ausgetauscht werden können. Handelsübliche GPS Geräte lassen sich somit an einer einmal entwickelten Schnittstelle problemlos auslesen.

Bei allen NMEA Nachrichten ist das Abfragenachrichtenformat gleich. Sie unterscheiden sich lediglich durch ihre mitgeführte Nachrichtenennung. Tabelle 4.1 zeigt den Aufbau des Formates.

Tabelle 4.1: Abfragenachrichtenformat bei NMEA0183

Format	Inhalt
\$PLEIQ,	Kopfzeile
XXX,	Nachrichtenennung
x,	Schnittstelle
x	Ausgabegerät
*hh	Checksumme
<CR>	Carriage Return
<LF>	Line Feed

Gebäuchliche Nachrichtenennungen sind zum Beispiel:

- GGA - Global Positioning System Fixierte Daten
- GSK - Echtzeit Position mit DOP
- GSV - Sichtbare GPS Satelliten
- VTG - Kurs über Grund und Geschwindigkeit
- ZDA - Zeit und Datum

Zur Positionsbestimmung bieten sich insbesondere Nachrichten mit der Kennung *GGK* an, da diese alle notwendigen Informationen zur Bestimmung der Position enthält. Den allgemeinen Inhalt einer solchen Nachricht stellt Tabelle 4.2 vor. Es sind Zeit- und zum Datumsangaben, die Lage und die Höhe der momentanen Position und Angaben zu den verwendeten Satelliten enthalten.

Tabelle 4.2: Inhalt einer Nachricht mit GPK Kennung

Format	Inhalt
\$GPGGK,	Kopfzeile
hhmmss.ss,	UTC der Position Fix
mmddy,	UTC Datum
lll.ll,	Breite
a,	Hemisphäre „N“/„S“
yyyyy.yy,	Länge
a,	„O“/„W“
x,	GPS-Qualitätsindikator
xx,	Anzahl verwendeter Satelliten
x.x,	GDOP
EHT	Ellipsoidische Höhe
x.x,	Antennenhöhe
M,	Einheit der Höhenmeter
*hh	Checksumme
<CR>	Carriage Return
<LF>	Line Feed

Die Ausgabe der Lage erfolgt stets in Form *GradMinuten.Dezimal*. Dies rührt aus dem Zusammenhang

$$1sm \hat{=} 1'3,$$

welcher gerade im Bereich der Seefahrt von großer Bedeutung ist.

4.2.2 Notwendige Transformationen

Die in den Rohdatensätzen enthaltenen Informationen über die Position werden standardmäßig bezüglich des WGS84 Ellipsoids ausgegeben. Andere, lokal gebräuchliche Referenzsysteme sind in den Standards der NMEA nicht vorgesehen. Das vorhandene Datenmaterial, im lokal beschränkten Bereich, bezieht sich jedoch üblicherweise auf andere Ellipsoide. So zum Beispiel in Deutschland auf das Bessel1841 Ellipsoid. Auch bei den eingesetzten Koordinaten gibt es lokale Präferenzen, wie zum Beispiel die Verwendung von Gauß-Krüger Koordinaten. Damit ist es unumgänglich die vom GPS Empfänger gelieferten Koordinaten zu transformieren.

Um nun die ausgegebene Position in ein den Daten zugrundeliegendes, konformes System zu transformieren, bietet sich das Modell der räumlichen Ähnlichkeitstransformation mit 7 Parametern an. Dabei wird mittels

$$\vec{x}' = m \cdot \mathcal{R} \cdot (\vec{x} - t'),$$

die Beziehung zwischen zwei Referenzsystemen hergestellt. \mathcal{R} beschreibt darin eine 3×3 Drehmatrix die von den drei Drehwinkeln ϵ_1, ϵ_2 und ϵ_3 abhängig ist. Der Parameter m

³ $1sm=1852m$

enthält den Maßstabsfaktor und der Spaltenvektor t' die drei notwendigen Translationsparameter.

Der Übergang zwischen den einzelnen Parametersystemen bezogen auf dasselbe Ellipsoid ist abhängig vom Ausgangs- und vom Zielsystem. Der Zusammenhang zwischen den geographischen Koordinaten B, L, h und den kartesischen Koordinaten X, Y, Z ergibt sich nach [Heck u. a. 1993] zu

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cos B \cos L \\ (N + h) \cos B \sin L \\ ((1 - e^2) N + h) \sin B \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

mit dem Querkrümmungshalbmesser N und e^2 , der zweiten numerischen Exzentrizität. Die Berechnung von geographischen aus kartesischen, also die Umkehrung der genannten Beziehung 4.1, erfolgt für die Länge L nach

$$L = \arctan \frac{y}{x} .$$

Die Breite hingegen lässt sich nicht direkt, sondern mit der Iterationsvorschrift

$$B_i = \arctan \left(\frac{z + e^2 \cdot N_{i-1} \cdot \sin(B_{i-1})}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

und dem Startwert

$$B_0 = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

ermitteln. Die Berechnung von h ergibt sich zu

$$h = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos(B) - N} .$$

Geographische Koordinaten lassen sich durch die Beziehung

$$\begin{pmatrix} R \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 (Nl \cos B + \dots) \\ m_0 \left(G(B) + \frac{Ntl^2 \cos^2 B}{2} + \dots \right) \end{pmatrix}$$

in Gauß-Krüger-Koordinaten (R für: Rechtswert, H für: Hochwert) umwandeln. Hiermit und mittels

$$R = R + K_z \cdot 10^6 + 500000$$

$$H = H$$

ergeben sich dann die endgültigen Koordinaten im GK-System. K_z gibt dabei die eindeutige Kennziffer des GK- Streifens an und ist bestimmbar durch:

$$K_z = \frac{L_0}{3^\circ}.$$

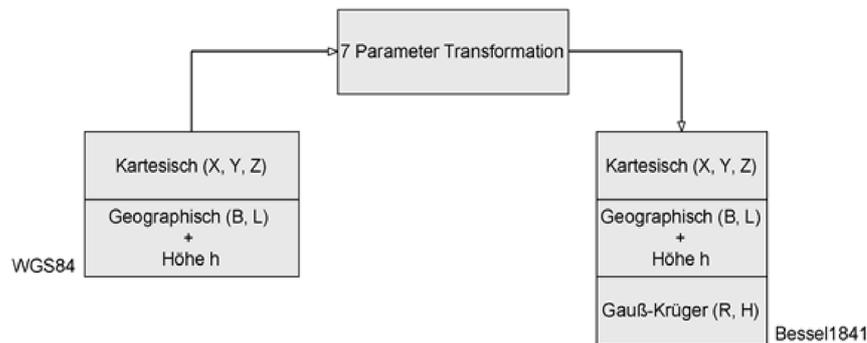


Abbildung 4.2: Ablauf der Transformation

Die implementierte Transformation, graphisch in Abbildung 4.2 dargestellt, geht nun analog zu den oben angegebenen Gleichungen vor. Ausgehend von den vom Empfänger gelieferten Datensätzen, geographische Koordinaten bezogen auf das WGS84 Ellipsoid, werden zunächst kartesische Koordinaten auf demselben Ellipsoid berechnet. Der Ellipsoidübergang auf das Ellipsoid nach Bessel erfolgt mit Hilfe einer 7-Parameter-Transformation. Welches Parametersystem letztlich verwendet wird hängt von dem vorhandenen, zu visualisierenden Datenmaterial ab. Deshalb besteht bei der hier vorgestellten Lösung die Möglichkeit, sowohl kartesische, geographische, als auch Gauß-Krüger-Koordinaten zu verarbeiten. Damit kann die Anwendung mit Geodaten bezogen auf unterschiedliche Parametersysteme betrieben werden. Der Anwender ist in seiner Wahl der Daten flexibel.

4.2.3 Auslesefrequenz der verwendbaren Nachrichtensätze

Bei der Verwendung von NMEA0183 Datensätzen zur Positionsbestimmung ist ein entscheidendes Kriterium die Frequenz mit welcher die Informationen über die RS232 Schnittstelle ausgelesen werden können. Eine zu niedrig gewählte Frequenz würde dazu führen, dass die translatorischen Veränderungen nur unzureichend abgedeckt wären. Eine zu hoch gewählte Frequenz hingegen würde zu viel Rechenleistung in Anspruch nehmen und würde sich somit negativ auf die Gesamtleistung des Systems auswirken. Als Anhaltspunkt für die zu wählende Auslesefrequenz lässt sich eine Untersuchung nach [Rodewald u. Schlichting 1988] heranziehen. Hier wurden die natürlichen Gehgeschwindigkeiten des Menschen untersucht. Wie in Tabelle 4.3 dargestellt wird, ergeben sich je nach Beinlänge l für einen großen ($l = 1m$), kleinen ($l = 0,6m$) und einen Erwachsenen mit durchschnittlicher Beinlänge ($l = 0,8m$), unterschiedliche Geschwindigkeiten beim Gehen.

Tabelle 4.3: Natürliche Gehgeschwindigkeiten des Menschen

Beinlänge $l[m]$	Geschwindigkeit $v[\frac{m}{s}]$
1	1,4
0,8	1,25
0,6	1,1

Weiterhin gilt es zu berücksichtigen, dass aufgrund des zu tragenden Systems, des Untergrundes oder auch der körperlichen Verfassung des Anwenders die Gehgeschwindigkeit um einen gewissen Betrag reduziert werden muß. Damit lässt sich folgern, dass mit einer Auslesefrequenz von $f = 1Hz$, ein ausreichendes Ergebnis erreichbar ist.

Eine Steigerung der Auslesefrequenz auf $f = 5Hz$ ist bei den verwendeten Geräten die maximal wählbare und ist nur dann sinnvoll, wenn man aufgrund von stark verrauschten Messwerten diese entsprechend prozessiert und somit das Ergebnis der Positionsberechnung stabilisiert.

Mittelwertfilter

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Auslesefrequenz ohne merklich zusätzlich Rechenleistung in Anspruch nehmen zu müssen, bietet ein Mittelwertfilter. Dieses verwendet hierbei drei aufeinanderfolgende Messungen und berechnet daraus das arithmetische Mittel.

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad n = 3 \quad (4.2)$$

Dabei sinkt zwar die Aktualisierungsrate der Positionsinformation für $f = 1Hz$, verwendet man aber $f = 5Hz$ als Auslesefrequenz für eine Einzelmessung, so ergibt sich die neue Position, bei erfolgreicher Berechnung und Analyse, bereits nach $t = 0,6s$.

Für die Analyse und somit die Bestimmung von eventuell auftretenden Ausreißern wird das Testverfahren nach Nalimov verwendet. Dabei wird r^* für die zu aktualisierende Position nach 4.3 berechnet, und mit dem entsprechenden Wert aus der *R-Tabelle* verglichen.

$$r^* = \frac{|x^* - \bar{x}|}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad (4.3)$$

Gilt nun:

$$r^* > r(P\%, f) \quad f = n - 2$$

so handelt es sich bei dem untersuchten Wert um einen Ausreißer. Ist dies der Fall so wird der Messwert verworfen und stattdessen ein neuer in die Berechnung einbezogen. Es werden keine neuen Werte an das System übergeben, so lange der Test nicht bestanden ist.

4.2.4 Speichern der ausgelesenen Datensätze

Es besteht die Möglichkeit die ausgelesenen Datensätze zur späteren Analyse, während der Laufzeit in einer PostgreSQL ([PostgreSQL 2005]) Datenbank zu speichern. Diese werden in Abhängigkeit von ihrer Kennung in entsprechenden Relationen abgelegt. Die notwendige Verbindung wird mittels einer JDBC (*für*: Java Database Connectivity, [JDBC 2005]) Schnittstelle und entsprechenden Abfragen realisiert. Damit werden die Nachrichten unabhängig vom eingesetzten Empfänger und dem dort eingesetzten Format zur Datenspeicherung, lokal auf der mitgeführten Recheneinheit gespeichert. Außerdem können sie so in

einem Netzwerk zur Verfügung gestellt und von dritten in Echtzeit ausgewertet werden. Durch ein solches Vorgehen kann der vom Nutzer zurückgelegte Weg im Nachhinein oder während des Betriebs ausgewertet oder aber auch die Qualität der ausgelesenen Positionen überprüft werden. Mit diesen Informationen ist es möglich die vorhandenen Geodaten zu aktualisieren um so zum Beispiel ein in digitaler Form vorliegendes Wegenetz zu verdichten, um so für spätere Einsätze Alternativen bei der Berechnung des kürzesten Weges zu berücksichtigen. Auch lassen sich hiermit zusätzlich Rettungswege definieren oder Straßenbauvorhaben kontrollieren. Das Identifizieren von Funklöchern und die darauf aufbauende Planung eines Funknetzes, bestehend aus Verstärkern und zusätzlichen Basisstationen, wird hierdurch ebenfalls ermöglicht.

Es wird somit darauf geachtet, dass sowohl die reinen Messwerte, als auch die gerechneten Positionen in der Anwendung zur Verwendung kommen. Eine Tatsache, die für gewöhnlich kaum Berücksichtigung findet aber für die Nachbearbeitung von großem Interesse ist.

4.2.5 Die GPS Methode im Überblick

Das gesamte Vorgehen von der Auslesung bis zur Auswertung der GPS Messungen gestaltet sich entsprechend der Darstellung in Abbildung 4.3. Die Initialisierung der RS232 Schnittstelle wird durch Einbinden von entsprechenden Methoden der Open-Source Bibliothek RXTX, [RXTX 2005], realisiert. Entsprechende Parameter (Baudrate, Stopbits, Datenbits und Parität), welche das Auslesen der Schnittstelle erst ermöglichen, werden gesetzt und so die Kommunikation zwischen Rechen- und GPS-Einheit geöffnet. Bei einem empfangenen und vollständigen Nachrichtensatz wird anhand der Kennung entschieden, welche Informationen extrahiert werden müssen. Aus den Koordinaten läßt sich durch Transformationen (vgl. Abschnitt 4.2.2) die Position im Zielsystem bestimmen. Bei Verwendung der Datenbank werden zusätzlich auch alle übrigen, auftauchenden Nachrichtenelemente eines Satzes abgespeichert.

Somit läßt sich durch den Einsatz von GPS in Verbindung mit einem ARS neben der notwendigen Positionsbestimmung auch die Aufgabe zur Geodatenaufnahme angehen. Dies hat den Vorteil, dass mit einem System, ausgelegt für AR, sich weitere Probleme lösen lassen für die sonst zusätzliche Geräte erforderlich wären.

4.2.6 Grenzen des Systems

Bei jeder Anwendung, in der GPS zum Einsatz kommt, gilt es darauf zu achten, dass der Empfang der Satellitensignale so wenig wie möglich durch äußere Einflüsse gestört wird. Der entscheidendste Faktor ist diesbezüglich die Sichtbarkeit der Satelliten. Unterhalb einer bestimmten Elevation (für gewöhnlich zwischen 10° und 20°) eintreffende Signale werden nicht verwendet. Daher sollte der darüberliegende Bereich möglichst frei von störenden Objekten, wie Bäumen oder Häusern gehalten werden. Auch sollten bei kürzeren Beobachtungszeiten mehrere Satelliten unter verschiedenen Zenitdistanzen und Azimuten beobachtet werden können. Weiterhin sollten Störeinflüsse wie Mehrweg- und Spiegeleffekte sowie Signalstörungen minimiert werden. Deshalb muß darauf geachtet werden, dass

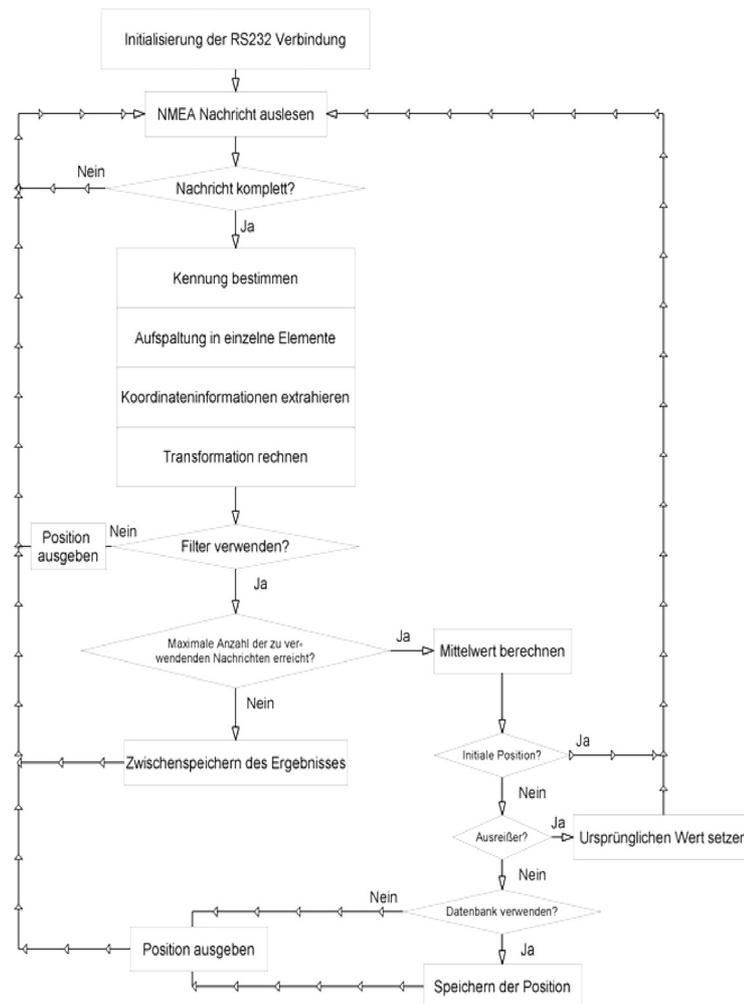


Abbildung 4.3: Ablauf der Auslesung und Verarbeitung

man sich nicht in direkter Nähe von metallischen Objekten, ebenen Flächen mit hohen Reflexionskoeffizienten oder Quellen starker elektromagnetischer Strahlung befindet, da es sonst zu unerwünschten Überlagerungen des Satellitensignals kommen kann.

Doch gerade bei der Anwendung von GPS im Außenbereich im Allgemeinen und als Teil eines Navigationssystems im Speziellen ist es oft nicht zu vermeiden, dass man solche Situationen vorfindet. Deshalb muß damit gerechnet werden, dass es zu temporären Störungen der Verfügbarkeit und/oder Verfälschungen der Satellitensignale kommen kann. Dann ist es vonnöten, dass man diesen Zeitraum überbrücken und so die kontinuierliche Bestimmung der Position gewährleisten kann. Somit wird es notwendig zusätzliche Sensoren zu verwenden die in Echtzeit weitere Informationen liefern, mit denen die Positionsbestimmung auch bei auftretenden Lücken im Empfang der Satellitensignale gesichert wird.

4.3 Die IMU

Neben der Positions- und Richtungsbestimmung besteht eine zusätzliche Aufgabe der Navigation in der Bestimmung der Orientierung, also der Lage des Systems im Raum. Damit ergibt sich die Notwendigkeit weitere drei Freiheitsgrade zu bestimmen. Für die Ermittlung der rotatorischen Komponente bietet sich die Verwendung einer IMU an. Da ein solcher Sensor jedoch, wie in Abschnitt 2.4.4 bereits angedeutet, zusätzliche Messwerte liefert, kann mit diesen eine weitere Aufgabe angegangen werden. Durch die Tatsache, dass die Möglichkeit besteht Beschleunigungen auszulesen, kann der zurückgelegte Weg der Plattform berechnet werden.

Da verschiedenartig aufgebaute, auf unterschiedlichste Art und Weise arbeitende IMUs existieren, soll im folgenden der für diese Arbeit verwendete Sensor der Firma Xsens, [Xsens 2005], beschrieben werden. Dieser besteht unter anderem aus mehreren mikro-mechanischen kapazitiven Wegaufnehmern. Deren Bauteile wiederum sind zwei Kondensatorplatten, eine der beiden ist beweglich. Eine auf den Sensor wirkende äußere Kraft bewirkt nun, dass sich der Abstand zwischen den beiden Kondensatorplatten und somit die Kapazität des Kondensators ändert. Daraus lassen sich dann die eigentlichen Messwerte wie Orientierung oder Beschleunigung bestimmen. Charakteristisch für diesen Sensor sind weiterhin seine Maße von $39\text{mm} \times 54\text{mm} \times 28\text{mm}$ (B×L×H), sowie sein geringes Gewicht von 35g . Damit ist er für die hier vorgestellte Anwendung geeignet. Abbildung 4.4 zeigt den Sensor.



Abbildung 4.4: Xsens IMU (Quelle: [Xsens 2005])

Die Ausgabe kann in unterschiedlichen Formaten erfolgen. Ein Satz der gesamten Sensormessungen, sprich Beschleunigungs-, Kreisel-, Magnetometer- und Temperatursensoren kann in einem einzigen als korrigierte oder unkorrigierte Messung ausgelesen werden. Außerdem ist es möglich die Orientierung in Form von Euler-Winkeln oder als Quaternionen auszulesen. Die Ausgabefrequenz lässt sich aus dem Bereich zwischen 25Hz und 512Hz wählen. Bei den gerade aufgezählten Eigenschaften handelt es sich um interne Eigenschaften der IMU, welche vom Nutzer vor der Verwendung des Sensors festgelegt werden können. Dies macht es notwendig die Schnittstelle zur Recheneinheit so zu entwerfen, dass diese auch in der Lage ist die entsprechenden Messwerte zu erfassen.

Genauere Information finden sich in den folgenden Abschnitten. Hier wird auch auf die auftretenden Schwierigkeiten bei der Verwendung dieser speziellen IMU eingegangen. Abschließend wird gezeigt wie sich GPS und Inertialsensor in diesem speziellen Fall miteinander verbinden lassen.

4.3.1 Orientierung

Die Bestimmung der drei rotatorischen Komponenten erfolgt intern durch drei Kreisel welche auf der MEMS (*für*: Micro-Electro-Mechanical Systems) Technologie basieren. Zusätzlich wird das Magnetfeld der Erde bestimmt und somit ein übergeordnetes Referenzsystem auf welches die berechneten Winkel sich beziehen. Notwendige Korrekturdaten werden intern an den originären Messdaten angebracht und sind durch werksseitige Kalibrierung bekannt. Die sich daraus ergebende relative Genauigkeit wird vom Hersteller mit $< 1^\circ$ angegeben, während die Winkelauflösung mit $0,05^\circ$ angegeben wird. Eine weiterführende Untersuchung bezüglich der Genauigkeit der Orientierungsmessungen dieses Sensors findet sich in [Leebmann 2005]. Es zeigt sich hierbei, dass die zu erwartende Genauigkeit abhängig von der betroffenen Rotationsachse des Sensors ist. Von besonderem Interesse ist hierbei die Drehung um die z -Achse. Diese zeigt bei entsprechender Ausrichtung des Sensors nach „oben“, also quasi entgegen der Lotrichtung. Die ausgelesenen Messwerte bei Rotationen um diese Achse weisen die geringsten Fehler auf.

4.3.2 Beschleunigung

Ganz ähnlich zur Bestimmung der Orientierung basiert auch die Technik zur Messung der Beschleunigungen im Raum bei der in diese Arbeit verwendeten IMU auf der MEMS-Technologie. Laut Herstellerangaben beträgt der zu erwartende Fehler aufgrund von Rauschen $0,01 \frac{m}{s^2}$. Es handelt sich hierbei um drei kapazitive Beschleunigungssensoren, welche die Beschleunigungen entlang des sensorfesten Systems bestimmen. Diese Messwerte sind allerdings, im Gegensatz zu den Orientierungsmessungen, noch nicht korrigiert. Das heißt, dass weder das Rauschen des Sensors, noch die Erdbeschleunigung, noch sonstige Fehleinflüsse vor der Ausgabe in irgendeiner Art in Betracht gezogen werden. Es ist somit vonnöten diese bestmöglich zu bestimmen und in den Berechnungen zu berücksichtigen.

Schwere der Erde

Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang ist die Erdbeschleunigung, da diese nicht ohne weiteres kompensiert werden kann und doch bei jeder Messung berücksichtigt werden muß. Nach [Torge 2003] läßt sich die Schwere γ_0 , in der Einheit $\frac{m}{s^2}$, abhängig von der geographischen Breite φ nach

$$\gamma_0 = \gamma_a(1 + \beta \sin^2 \varphi + \beta_1 \sin^2 2\varphi) \quad (4.4)$$

mit den Konstanten $\gamma_a = 9,780318 \frac{m}{s^2}$, $\beta = 0,0053024$, $\beta_1 = -0,0000059$ berechnen.

Mit dem so erhaltenen Ergebnis lassen sich die tatsächlichen Sensormesswerte vergleichen. Dies wiederum lässt Rückschlüsse auf die erreichte Genauigkeit zu.

4.3.3 Auswertung der Messungen

Das Ziel ist es die Sensormessungen so zu verbessern, dass hiermit am Ende des Rechenvorgangs eine Aussage über den zurückgelegten Weg der Plattform getroffen werden kann. Will man dies mit Hilfe der IMU bewerkstelligen, so ist es notwendig die Messungen mehreren Auswerteschritten zu unterziehen, welche in den nachfolgenden Abschnitten im Detail erklärt werden. Zunächst gilt es die gemessene Erdschwere unter kontrollierbaren Bedingungen zu bestimmen, um diese während des Betriebs des Gesamtsystems, an die Beschleunigungsmessungen als Korrekturwerte anzubringen.

Berücksichtigung der Erdschwere

Ähnlich wie bei der Genauigkeitsbestimmung des Sensors bezüglich der gemessenen Orientierung, werden zunächst die Beschleunigungs- und Kreismessungen bei unterschiedlicher Ausrichtung der Sensorachsen untersucht. Dadurch besteht die Möglichkeit die Messungen in Echtzeit, mit denen aus der Untersuchung, unabhängig von der Orientierung des Sensors, zu verbessern. Der Sensor wird für diesen Vorgang in einem Kalibrierrahmen fixiert und auf einer glatten, fixen Ebene ausgelesen. Durch die Verwendung eines Kalibrierrahmens wird verhindert, dass sich der Sensor während eines Messvorgangs bewegt. Die vorgenommenen Messungen gestalten sich in der Form, dass in Lage I eine der Sensorachsen nach „oben“, also entlang der Ebenennormalen, zeigt. Gemessen wird dann in den Stellungen 0° , 90° , 180° , 270° und 360° für jeweils 5 Minuten. Bei einer Auslesefrequenz $f = 100\text{Hz}$ ergeben sich somit pro Achse, Lage und Orientierung 30000 Einzelmesswerte. Der nächste Satz Messungen erfolgt dann in Lage II. Hierbei zeigt dann die entsprechende Achse nach „unten“. Auch hier werden 5 Messungen durchgeführt. Sind dann die Messungen einer Achse abgeschlossen, so wird das Vorgehen für die beiden anderen Achsen wiederholt. Verdeutlicht wird das Vorgehen in Abbildung 4.5. Führt man dies nun für jede Achse (x, y, z) entsprechend durch so erhält man insgesamt 30 Messungen à 30000 Einzelmesswerten.

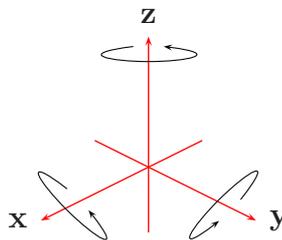


Abbildung 4.5: Drehung des Inertialsensors zur Kalibrierung

Jeder Satz, entsprechend der Orientierung (0° , 90° , 180° , 270° und 360°), Sensorachse (X, Y, Z) und Lage(I, II), wird durch die Bildung des arithmetischen Mittels nach

$$\bar{x}_{\text{Orientierung,Achse,Lage}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad n:\text{Anzahl Einzelmessungen je Messanordnung}$$

ausgewertet. Daran anschließend werden nun alle fünf Messungen einer Lage gemittelt zu

$$\bar{a}_{Achse,Lage} = \frac{1}{5} \cdot \sum \bar{x}_{Orientierung,Achse,Lage}$$

und man erhält den, auf jede Sensorachse, wirkenden Anteil der Schwerebeschleunigung. Bei der Messung in nur einer Lage, was mit einem einzigen Sensor der Fall ist, da dieser während des Betriebs nicht in die zweite Lage gedreht werden kann, wird zur Korrektur der Messwerte $\bar{a}_{Achse,Lage}$ verwendet. Damit ist der Anteil der Schwerebeschleunigung in den für die Bestimmung des zurückgelegten Weges verwendeten Messwerte nicht mehr enthalten.

Analog hierzu läßt sich auch bei den Messwerten des Kreiselsystems vorgehen. Mit den gleichen Berechnungsformeln, jedoch anderen Bezeichnern (k statt a) erhält man damit dann $\bar{k}_{Achse,Lage}$. Diese Werte können zur Korrektur der Erdrotation eingesetzt werden.

Bestimmung des zurückgelegten Weges

Durch die Kenntnis der Beschleunigungen ist es theoretisch möglich durch zweifache Integration auf den zurückgelegten Weg zu schließen. Es ist jedoch notwendig die fehlerbehafteten Messungen zu korrigieren und entsprechend der Orientierung des Sensors zu verbessern. Eine mögliche, zusätzliche zeitliche Drift wird durch die simultane Messung aller für die Auswertung relevanten Daten vermieden. Hierzu zählen die Orientierung, die Beschleunigung und die Winkelgeschwindigkeit.

Ein Beispiel für das Verhalten des ruhenden Sensors bei einer Messung der Beschleunigungen zeigt Abbildung 4.6.

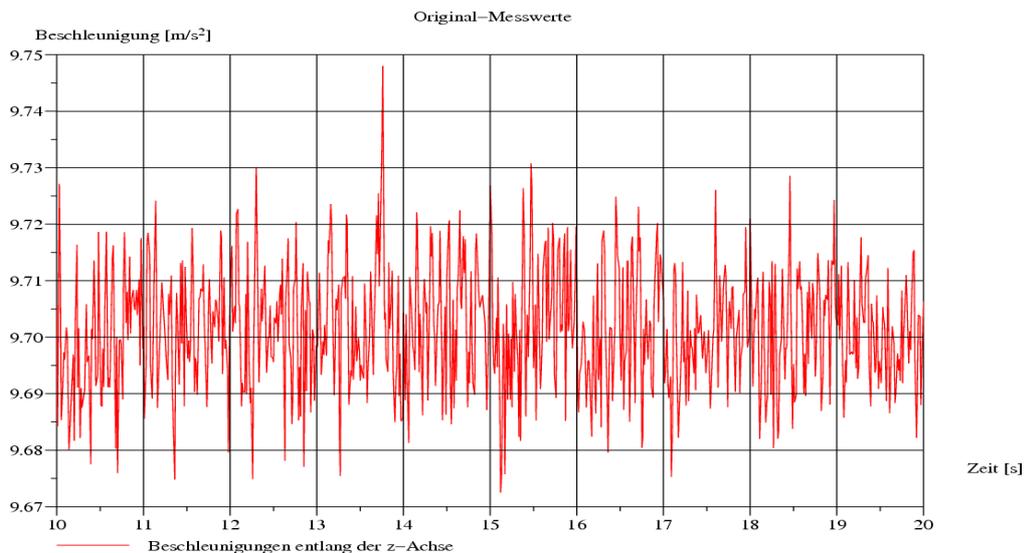


Abbildung 4.6: Beispielmessung der verwendeten IMU

Zu erkennen ist wie stark die Messungen, selbst bei einem sich in Ruhe befindenden Sensor, rauschen. Um nun diese Fehler zu beseitigen wird nachfolgend eine Berechnungsmethode vorgeschlagen, deren Ergebnis eine Aussage über das Verhalten der Plattform während eines Zeitraums Δt erlaubt. Das Stichproben-Mittel beträgt bei der dargestellten Beispielmessung $\bar{x} = 9,7014666 \frac{m}{s^2}$. Die erreichte Standardabweichung $\sigma = 0,0108810 \frac{m}{s^2}$ liegt im Bereich der vom Hersteller angegebenen.

In Abbildung 4.7 wird schematisch der vollständige Ablauf der Berechnungen dargestellt, welche notwendig sind um aus den ausgelesenen Messdaten den letztlich zurückgelegten Weg zu bestimmen.

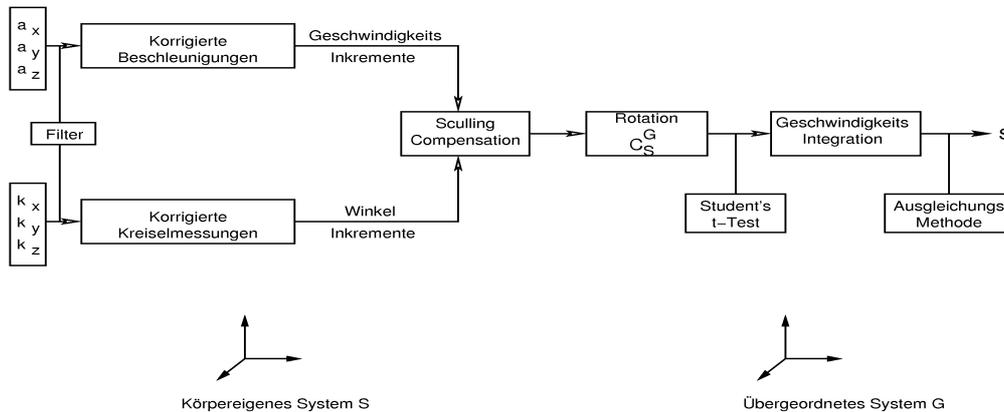


Abbildung 4.7: Ablaufdiagramm zur Auswertung der IMU Messwerte

Zunächst werden die rohen Messdaten (a_x, a_y, a_z) der Beschleunigungs- und (k_x, k_y, k_z) der Kreiselsensoren korrigiert. Hierfür werden zu Beginn der Methode grobe Ausreisser eliminiert. Dies geschieht mit Hilfe eines Medianfilters. Das hier verwendete Filter besitzt eine Fensterbreite der Größe 5, wodurch auch zwei benachbarte Ausreisser geglättet werden können. Die daraus entstehenden neuen Messreihen, werden in einem nächsten Schritt mit einem gleitenden Mittelwertfilter weiter aufbereitet. Dies führt nun dazu, dass benachbarte Werte sich in ihrer Ausprägung angleichen und so Sprünge zwischen zwei Messzeitpunkten unterdrückt werden. Ein solches Filter wird durch

$$x\left(i + \frac{w}{2}\right) = \frac{1}{w} \cdot \sum_{j=0}^{w-1} x \cdot (i + j) \quad \text{w: Fenstergröße}$$

gebildet. w variiert hierbei mit der Anzahl der zu untersuchenden Messwerte n gemäß $w = \frac{1}{20} \cdot n$. Durch eine viermalige Ausführung des gleitenden Mittelwertfilters entsteht eine Glättung des Eingangssignals ähnlich eines Gauß-Filters, beschrieben in [Smith 1999]. Der neue Mittelwert $\bar{x} = 9,7014213 \frac{m}{s^2}$ unterscheidet sich vom originären minimal ($\Delta\bar{x} = 0,0000453 \frac{m}{s^2}$). Somit haben die Filtermethoden die ursprüngliche Messreihe zwar verändert, den Mittelwert der Beschleunigung aber kaum beeinflusst. Die Standardabweichung hingegen konnte deutlich auf $\sigma = 0,001 \frac{m}{s^2}$ gesteigert werden, was sich auch in Abbildung 4.8 widerspiegelt.

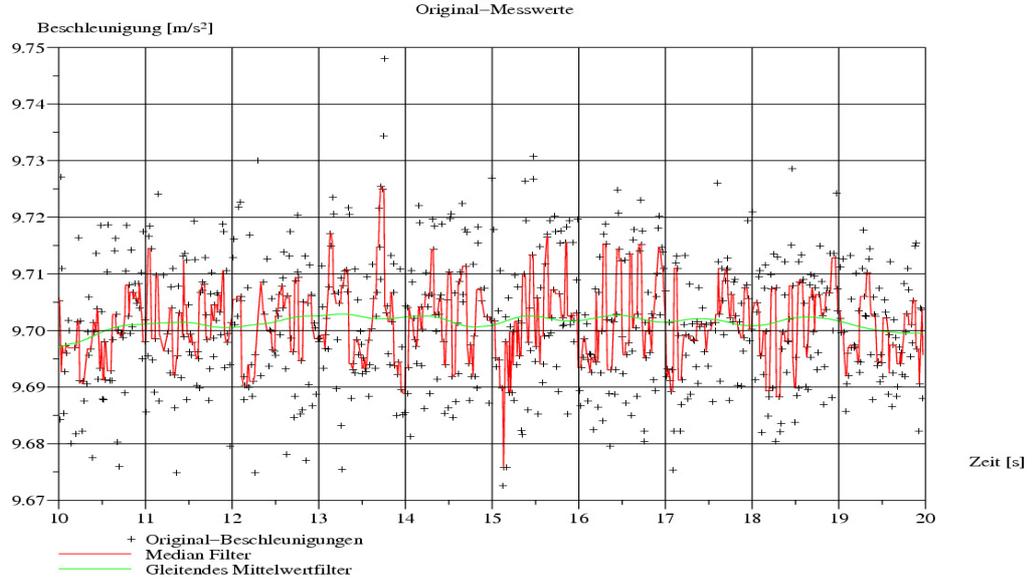


Abbildung 4.8: Gefilterte Messungen

Im nächsten Schritt werden nun $\bar{a}_{Achse,Lage}$ bzw. $\bar{k}_{Achse,Lage}$ von den entstandenen gefilterten Messdaten für die Beschleunigungen bzw. die Winkelgeschwindigkeiten subtrahiert, um von diesen den Einfluß der Schwerebeschleunigung bzw. der Erdrotation zu beseitigen. Als Ergebnis erhält man \tilde{a}_{Achse} , bzw. \tilde{k}_{Achse} .

Daran anschließend können nun die beide Messreihen über die Zeit integriert werden, und es ergeben sich die entsprechenden Geschwindigkeitsinkremente zu

$$\tilde{v}_{Achse} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \tilde{a}_{Achse} dt \quad (4.5)$$

bzw. die Winkelinkremente gemäß

$$\tilde{w}_{Achse} = \int_{t_n}^{t_{n+1}} \tilde{k}_{Achse} dt. \quad (4.6)$$

Die Zusammenführung der beiden korrigierten Messreihen \tilde{v}_{Achse} und \tilde{w}_{Achse} und somit die Bestimmung der Geschwindigkeiten \hat{v} im körpereigenen System S des Sensors geschieht mittels

$$\left\{ \frac{d\vec{f}}{dt} \right\}_S = \left\{ \frac{d\vec{f}}{dt} \right\}_I - \omega \times \vec{f}. \quad (4.7)$$

Gleichung 4.7 beschreibt dabei allgemein den Übergang von einem Inertialsystem I zum Sensorsystem S . Dieser Zusammenhang gilt allgemein für eine beliebige zeitabhängige Funktion \vec{f} .

Mittels Integration von Gleichung 4.7 und einsetzen der Gleichungen 4.5 und 4.6 ergibt sich eine Lösung, welche durch Gleichungsblock 4.8 und den Anfangswerten $\hat{v}_x = \hat{v}_y = \hat{v}_z = 0$ gelöst werden kann. Hierbei handelt es sich um eine sogenannte „Sculling Compensation“, eine Form der Integration, deren Beschreibung z. B. in [Salychev 2004] nachgelesen werden kann.

$$\begin{aligned}
\hat{v}_{x,k} &= \hat{v}_{x,k-1} + \hat{v}_{y,k-1} \cdot \tilde{w}_{z,k} - \hat{v}_{z,k-1} \cdot \tilde{w}_{y,k} + \tilde{v}_{x,k} \\
\hat{v}_{y,k} &= \hat{v}_{y,k-1} + \hat{v}_{z,k-1} \cdot \tilde{w}_{x,k} - \hat{v}_{x,k-1} \cdot \tilde{w}_{z,k} + \tilde{v}_{y,k} \\
\hat{v}_{z,k} &= \hat{v}_{z,k-1} + \hat{v}_{x,k-1} \cdot \tilde{w}_{y,k} - \hat{v}_{y,k-1} \cdot \tilde{w}_{x,k} + \tilde{v}_{z,k} \\
\hat{v}_{z,k} &= \hat{v}_{z,k-1} + \hat{v}_{x,k} \cdot \tilde{w}_{y,k} - \hat{v}_{y,k} \cdot \tilde{w}_{x,k} + \tilde{v}_{z,k} \\
\hat{v}_{y,k} &= \hat{v}_{y,k-1} + \hat{v}_{z,k} \cdot \tilde{w}_{x,k} - \hat{v}_{x,k} \cdot \tilde{w}_{z,k} + \tilde{v}_{y,k} \\
\hat{v}_{x,k} &= \hat{v}_{x,k-1} + \hat{v}_{y,k} \cdot \tilde{w}_{z,k} - \hat{v}_{z,k} \cdot \tilde{w}_{y,k} + \tilde{v}_{x,k}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Jetzt müssen noch die \hat{v} bezogen auf das sensorfeste System S in ein übergeordnetes Bezugssystem transformiert werden. Der Übergang vom körpereigenen System S des Sensors zu einem globalen System G wird durch die ebenfalls zeitgleich ausgelesenen Orientierungen realisiert. Diese liegen hier in Form von Quaternionen q vor. Dadurch ergibt sich die Transformationsvorschrift wie folgt:

$$\hat{v}_G = q \cdot \hat{v}_S \cdot q^*$$

q^* beschreibt dabei die Konjugierte von q .

Zur weiteren Verbesserung der Geschwindigkeitsinkremente definiert man ein Konfidenzintervall mit der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,001$, woraus sich das Quantil zu $t_{\infty,0,9995}$ ergibt. Es werden eine obere und eine untere Schranke nach

$$t_{o,u} = \hat{v}_G \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot t_{\infty,0,9995}$$

berechnet. Das Intervall $I = [t_u, t_o]$ gibt den Bereich an in dem die Geschwindigkeiten auf null gesetzt werden können, also keine Bewegung vorlag. Damit bleiben nur noch jene Werte übrig, die auf eine tatsächliche Bewegung hindeuten. Diese werden nun ein zweites Mal integriert und man erhält so den gesuchten, zurückgelegten Weg.

In einem Weg-Zeit-Diagramm lassen sich die Ergebnisse, die man durch die Anwendung der beschriebenen Methode erhält, visualisieren. Es zeigt sich, dass zwischen einem bewegten und einem unbewegten Sensor ein signifikanter Unterschied im Verlauf der Graphen auftritt. Im folgenden wird davon ausgegangen, dass auf den Sensor keine abrupten Beschleunigungsänderungen wirken. Für diesen Fall erkennt man einen parabelförmigen An- bzw. Abstieg (Abbildung 4.9(a)) während der unterschiedlichen Beschleunigungsphasen. Abrupte Änderungen während der Beschleunigung würde unweigerlich dazu führen, dass die Auswertung durch Spitzen in der Messreihe nicht länger kontrollierbar wäre. Bei einem Sensor welcher sich in Ruhe befindet, also nur aufgrund der Erdrotation bewegt, stellt sich der resultierende Graph in Form von Geradenabschnitten dar, siehe Abbildung 4.9(b). Solch signifikante Unterschiede erlauben es nun festzustellen, ob sich der Sensor in einem gewissen Zeitabschnitt translatorisch bewegt hat oder nicht. Tritt der Fall wie in

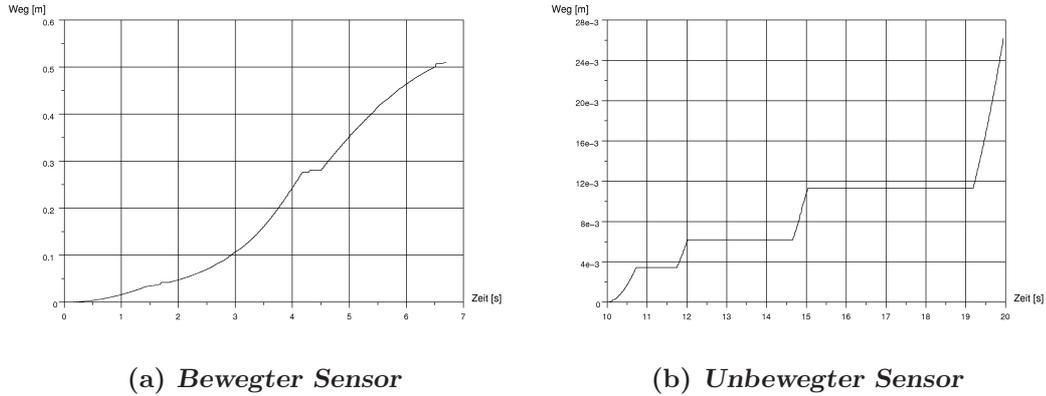


Abbildung 4.9: Ergebnisse des erläuterten Vorgehens bei unterschiedlichen Sensorzuständen

Abbildung 4.9(a) zeigt auf, so handelt es sich in diesem Intervall um keine vom Menschen verursachte Bewegung, sondern um Unzulänglichkeiten des Sensors.

Rechnerisch lässt sich nun ermitteln welcher der beiden beschriebenen Fälle aufgetreten ist. Hierzu dient folgende Matrix:

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2 & \sum_{i=1}^n ((x_i - x_s) \cdot (y_i - y_s)) \\ \sum_{i=1}^n ((x_i - x_s) \cdot (y_i - y_s)) & \sum_{i=1}^n (y_i - y_s)^2 \end{pmatrix}$$

Der hieraus berechnete minimale Eigenwert ist gleich dem Minimalwert der Summe der Quadrate der orthogonalen Abstände zur ausgleichenden Gerade, [Kampmann u. Renner 2004]. Vergleicht man diesen mit einer zuvor festgelegten Schranke, die sich empirisch aus entsprechenden Tests mit einem bewegten Sensor ermitteln läßt, und stellt fest, dass diese nicht überschritten wird, so kann von einem linearen Anstieg ausgegangen werden. Der Weg kann folglich für dieses Intervall auf null gesetzt werden. Wird andererseits die Schranke überschritten, so kann von einer Bewegung ausgegangen und folglich der gerechnete Wert als eine tatsächlich zurückgelegte Strecke angesehen werden.

4.3.4 Ergebnis der Auswertung

Die vorgestellte Auswertemethodik zur Verarbeitung von Messwerten einer IMU lässt sich auf einen unbewegten Sensor anwenden. Für den Fall, dass die IMU bewegt wird muß die Art der Bewegung berücksichtigt werden. Bei solchen, die frei sind von abrupten Brems- und Beschleunigungseinflüssen kann der beschriebene Ansatz eingesetzt werden. Bei allen anderen, wozu auch der Gang des Menschen zählt, ist dies nicht der Fall. Hierbei werden die Messwerte durch das Aufsetzen des Fußes auf dem Untergrund zu stark verfälscht um einer solchen Auswertung unterzogen werden zu können.

Die präsentierte Lösung für die Auswertung der Kreisel- und Beschleunigungsmessungen, lässt sich in das Gesamtsystem integrieren. Es ist hiermit für eine gewisse Zeit möglich festzustellen, ob sich die Trägerplattform bewegt hat oder nicht. Somit kann dieser Ansatz dazu verwendet werden, um die Überlagerung der künstlichen Objekte mit der Umgebung für einen gewissen Zeitraum zu gewährleisten. Der überprüfbare Bereich für einen sich in Ruhe befindlichen Sensor liegt bei 40 Sekunden, eine Verlängerung dieses Zeitraums führt unweigerlich dazu, dass die Auswertung nicht mehr zu kontrollieren ist. Die Gründe hierfür sind beim Sensor selbst zu suchen, da die Drift zu groß wird. Für die Überlagerung der Umgebung mit künstlichen Objekten jedoch, stellt diese Lösung eine durchaus nützliche Erweiterung dar.

4.4 Die Videokamera

Die Anbindung eines weiteren Sensors zur Stabilisierung der Positionsbestimmung ist aufgrund der präsentierten Ergebnisse im vorigen Abschnitt sowohl sinnvoll als auch notwendig. Damit wird es möglich nicht nur die Position einer sich in Ruhe befindlichen Plattform zusätzlich zu stützen, sondern auch den Ort einer bewegten, unter schwierigen äußeren Umständen und bei komplexen Bewegungsabläufen, zu bestimmen.

Der Einsatz einer, oder mehrerer Kameras ist im terrestrischen Bereich zur Objekterkennung und -verfolgung weit verbreitet, vgl. [Dalaff u. a. 2003], [Grest u. Koch 2004], [Ellis u. Xu 2001] oder [Beleznai u. a. 2002].

Der im folgenden vorgestellte Ansatz verknüpft eine IEEE1394 (Firewire) Videokamera der Firma PointGrey, siehe [Point Grey Research Inc. 2005], mit dem zuvor eingeführten System bestehend aus GPS und IMU. Die entsprechende Kamera ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Durch die Detektion beliebiger, linienhafter Strukturen im Raum, deren Verfolgung und den zusätzlich erhaltenen Informationen des Satelliten- und Trägheitssystems lässt sich die Position in Echtzeit berechnen. Dieser Vorgang wird in Abschnitt 4.4.2 näher erläutert.



Abbildung 4.10: Firewire Videokamera (Quelle: [Point Grey Research Inc. 2005])

4.4.1 Softwareseitige Realisierung

Die Anbindung der Kamera an die Recheneinheit geschieht mit der Open Source Klassenbibliothek OpenCV [Intel Corporation 2005]. Diese stellt Methoden zur Verfügung mit denen auf bequeme Art und Weise Digitale Bildverarbeitung betrieben werden kann. Der Vorteil ist, dass man ein fertiges, getestetes und vor allem optimiertes Paket an verschiedenen Klassen erhält. Das Hauptaugenmerk kann folglich auf die Navigationskomponente und die Kopplung der Sensoren gerichtet werden.

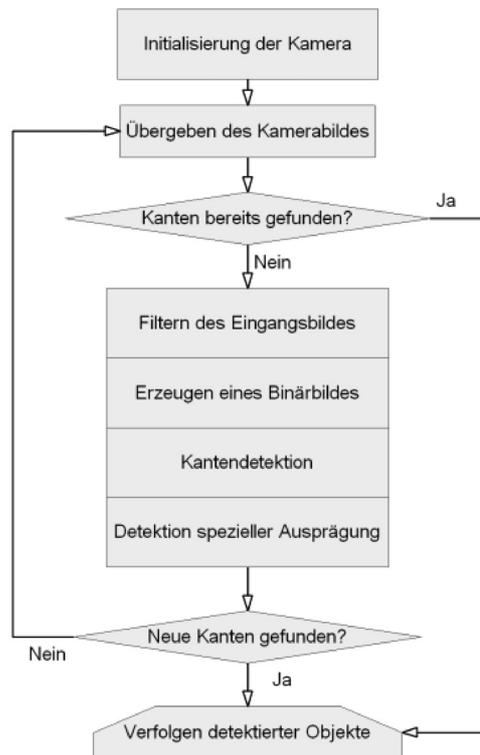


Abbildung 4.11: Ablauf der Kameramethodik

Der Ablauf zur Detektion relevanter Daten wird in Abbildung 4.11 dargestellt. Nach der Initialisierung der Kamera und dem softwareseitigen Herstellen einer Verbindung der Datenübertragung zwischen Kamera und Recheneinheit ist es zunächst notwendig die aufgenommenen Bilder für die Informationsextraktion aufzubereiten. Hierfür stehen die in Abschnitt 3 erwähnten Filtermethoden zur Verfügung. Um mögliche Kanten extrahieren zu können, wird das Ergebnisbild anschließend in ein Binärbild umgewandelt. Mit einem Algorithmus zur Kantendetektion werden schließlich alle linienhaften Formen gefunden. Durch die Anwendung der Hough-Transformation und der Möglichkeit die geforderte Mindestlänge solcher Strukturen dynamisch in Echtzeit anzupassen, werden die gewünschten gesucht und selektiert. Das Ergebnis besteht nun aus einem Satz von $2n$ -Koordinaten im Bildsystem. n beschreibt dabei die Anzahl der Anfangs- und Endpunkte der detektierten linienhaften Strukturen. Damit ist der Messvorgang für den ersten Standpunkt abgeschlossen. Die extrahierten Punkte werden nun, während sich die Plattform weiterbewegt, verfolgt. Hierfür wird eine Methode verwendet welche auf einer Beschreibung nach

[Bouguet 2000] aufbaut. Ist die Basis zwischen den beiden Standpunkten entsprechend groß gewählt, werden die Punkte erneut aufgenommen. Aus den Aufnahmen der beiden Standpunkte lassen sich nun die entsprechenden Koordinaten der detektierten Objektpunkte berechnen. Verschwindet zwischen den beiden Standpunkten ein Punkt aus dem Gesichtsfeld des Anwenders, so wird dieser bei den weiteren Berechnungen nicht mehr berücksichtigt.

Somit entsteht aus diesem Aufbau zum einen ein Aufnahmesystem für linienhafte Objekte. Für die Navigation hingegen reicht dieses Vorgehen noch nicht aus. Deshalb wird zusätzlich hierzu für die Bestimmung des Standpunktes, die Berechnung eines RRWS (für: Räumlichen Rückwärtsschnitts) implementiert. Damit ist es nun möglich bei Verlust des Satellitensignals die eigene Position aus den beobachteten Koordinaten der Objekte zu bestimmen.

4.4.2 Berechnung von Objektkoordinaten in einem übergeordneten System

Während bei der Verknüpfung von IMU und GPS Empfänger, so wie bei diesem Ansatz vorgeschlagen, die Bestimmung der Position unabhängig von der gegenseitigen Lagerung und Definition der Koordinatensysteme ist, so gilt es doch bei der zusätzlichen Verwendung der Kamera diese Sachverhalte zu berücksichtigen. Dabei müssen die gemessenen Koordinaten der Objekte vom Bildsystem in ein übergeordnetes System transformiert werden. Da für die IMU ebenfalls ein eigenes Koordinatensystem definiert ist, müssen auch diese Messungen einer entsprechenden Transformation unterzogen werden.

Nach [Leebmann 2005] lässt die gesamte Transformation bei zusammengesetzten Systemen von einem Ausgangs- in ein Zielsystem durch mehrere euklidische, einer projektiven Transformation, sowie einer perspektiven Division beschreiben. Die Matrizen zur euklidischen Transformation werden in der Form

$$\mathcal{T} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

dargestellt. Die obere 3×3 Matrix enthält die Elemente der Rotation, während der Vektor t_i die der Translation enthält. Die Matrix der projektiven Transformation lautet

$$\mathcal{P} = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & x_0 & 0 \\ d & c_2 & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Dabei beschreiben c_1 und c_2 Skalierungen in Zeilen- bzw. Spaltenrichtung, x_0 und y_0 den Bildhauptpunkt und d eine Scherung der Bildkoordinatenachsen. Durch eine Aneinanderreihung der Transformationsmatrizen und einer Funktion pD, für die perspektive Division, zur Transformation in das Bildkoordinatensystem, ergeben sich aus den Koordinaten der

Objektpunkte im übergeordneten System, definiert in homogener Form als

$$\mathbf{x}_{Referenzsystem} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix},$$

die Koordinaten im Bildkoordinatensystem zu

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \begin{pmatrix} \frac{x}{w} \\ \frac{y}{w} \\ \frac{z}{w} \\ w \end{pmatrix} = \text{pD} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} = \text{pD} \cdot \mathcal{P}_{Kamera}^{Anzeige} \mathcal{T}_{Referenzsystem}^{Kamera} \mathbf{x}_{Referenzsystem} \\ \Leftrightarrow \mathbf{v} &= \text{pD} \cdot \mathcal{P}_{Kamera}^{Anzeige} \mathcal{T}_{IMU}^{Kamera} \mathcal{T}_{Quelle}^{IMU} \mathcal{T}_{GPS}^{Quelle} \mathcal{T}_{Referenzsystem}^{GPS} \mathbf{x}_{Referenzsystem}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Die in Echtzeit zu bestimmenden Parameter der Transformationsvorschrift 4.9 sind lediglich die translatorischen von $\mathcal{T}_{Referenzsystem}^{GPS}$, sowie die rotatorischen der Matrix $\mathcal{T}_{Quelle}^{IMU}$ und die entsprechenden Bildpunkte der detektierten Objekte. Alle weiteren lassen sich a-priori durch eine Kalibrierung der Plattform bestimmen.

4.4.3 Berechnung des Standortes

Sind nun die korrespondierenden Bildpunkte von zwei Standpunkten aus gemessen, so läßt sich das entstandene Gleichungssystem mittels einer Ausgleichung lösen und man erhält die gesuchten Koordinaten der Objektpunkte in einem übergeordneten System.

Da diese Berechnung allerdings, je nach Konstellation der detektierten Punkte, einige Zeit in Anspruch nehmen kann, sollte es möglich sein die Rechenlast zu verteilen. Daher basiert der Informationsaustausch zwischen Kameramethodik und Hauptprogramm auf Sockets wodurch die Trennung von Berechnung und Verfolgung erfolgt.

Die Berechnung des Standpunktes der Plattform bei auftretenden Signalverlusten des GPS geschieht durch einen überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitt (Formeln z.B. nach [Albertz u. Kreiling 1989]). Hierfür werden die bereits bestimmten Objekt- und die gemessenen Bildkoordinaten verwendet und in die Ausgleichung eingeführt. Die benötigten Näherungswerte stammen aus den Messungen der IMU und des zuletzt aus GPS Messungen bekannten Standpunktes.

4.4.4 Mögliche Probleme bei der Kameramethodik

Durch das beschriebene Vorgehen bei der Aufnahme identischer Punkte von zwei Kamera-standpunkten aus lassen sich erste Schwierigkeiten erkennen. Kameras sind im allgemeinen immer abhängig von der vorherrschenden Beleuchtungssituation und der Form der aufzunehmenden Objekte. Stark reflektierende und bewegte Oberflächen sind problematisch. Gleiches gilt für eine unstrukturierte Landschaft in der klare Linien nicht zu erkennen sind. Es besteht also die Gefahr, dass linienhafte Objekte erkannt werden welche lediglich

durch den Schattenwurf der Objekte zustande gekommen sind. Solche können dann nicht weiter verfolgt werden, da sich durch eine Veränderung des Standpunktes ebenfalls die Lichtverhältnisse in der Szene und somit die Formen im Bild verändern. In Landschaften in denen kaum linienhafte Formen auftreten ist es hingegen schwierig überhaupt Objekte zur Verfolgung ausfindig zu machen. Solche Extremsituationen sollten demzufolge wenn möglich vermieden werden.

Da ein mobiles AR System eher in Gegenden eingesetzt wird in denen viele anthropogene Objekte vorzufinden sind, dürfte zumindest das zweite Problem relativ leicht zu umgehen sein. Häuser, Fensterrahmen, einfache Dachstrukturen oder Straßenkanten, Laternenpfähle usw. sind lediglich einige Beispiele für Objekte deren Konturen sich zur Verfolgung eignen. In andersartigen Landschaften können hierfür natürliche Objekte wie zum Beispiel Bäume verwendet werden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Kameraorientierung sich nicht dynamisch an die Orientierung der Trägerplattform anpasst. Dadurch wird es notwendig, dass die Kamera während der Bewegung stets durch Zutun des Anwenders auf die detektierten Objekte ausgerichtet ist. Durch das Montieren der Kamera auf einer elektromechanischen Plattform ließen sich die Messwerte der Orientierungssensoren, zusätzlich zur Kamerasteuerung gebrauchen. Mit Hilfe dieser Werte wäre es möglich, die Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme t_0 zu jedem Zeitpunkt t_i während der Bewegung zu rekonstruieren und so die detektierten Strukturen stets im Blickfeld der Kamera zu belassen.

4.5 Zusammenspiel der Komponenten

Die einzelnen Bestandteile, GPS Empfänger, IMU und Kamera, ergänzen sich zu einem System zur Positions- und Orientierungsbestimmung. Dabei bildet der GPS Empfänger die zentrale Komponente. Er wird für die Bereitstellung der Koordinaten des Standpunktes, sowohl für die endgültige Navigation als auch für die koordinatenmäßige Berechnung detektierter Objekte, eingesetzt. Durch den Einsatz der IMU wird zum einen die zunächst unbekannte Orientierung der Trägerplattform bestimmt. Außerdem ist es ihre Aufgabe die Koordinateninformation eines unbewegten Systems bei Satellitensignalverlust zu stützen. Die Videokamera dient der Aufnahme linienhafter Objekte. Durch die Bestimmung der Koordinaten solcher Objekte, lässt sich mittels eines räumlichen Rückwärtsschnitts der eigene Standpunkt berechnen. Hierfür werden die Messungen von GPS und IMU berücksichtigt. Weiterhin besteht die Möglichkeit die aufgenommenen Objekte zu Dokumentationszwecken abzuspeichern.

4.5.1 Bewertung des Systems

Durch die Verknüpfung mehrerer Sensoren die sich mit der Navigation befassen, gelingt es die Positionsbestimmung auch unter schwierigen äußeren Umständen aufrecht zu erhalten. Bei der Verwendung von GPS im Gelände muß ein gewisses Maß an Ausfallsicherheit gegeben sein. Da GPS dies nicht von sich aus bieten kann, müssen zusätzliche Sensoren Verwendung finden.

Der hier vorgeschlagene Ansatz hat den Vorteil, dass nur solche Sensoren mitgeführt werden, welche bei einem ARS ohnehin zum Einsatz kommen. Es besteht also nicht die Notwendigkeit weitere Sensoren in die Berechnung des Ortes zu integrieren. Insbesondere die Aufgaben der Kamera sind von großer Bedeutung. Sowohl bei der Stützung der Navigation, als auch der Dokumentation der betrachteten Umgebung findet sie Anwendung und erweitert somit das ARS über ein reines Visualisierungswerkzeug hinaus.

Weiterhin besitzt dieser Ansatz den Vorteil, dass es nicht notwendig ist das Gelände zu präparieren. Das Anbringen von Zielmarken ist nicht erforderlich, da stattdessen natürliche Objekte für die Verfolgung herangezogen werden.

Kapitel 5

Das Leitsystem

Zu jeder Navigationslösung gehört als wichtige Komponente eine graphische Benutzerschnittstelle. Da diese jedoch abhängig von der zugrundeliegenden Anwendung ist, werden in diesem Kapitel zunächst allgemeine Grundlagen der Mensch-Maschine Interaktion erläutert. Darauf aufbauend lassen sich Regeln definieren und Erfahrungen gewinnen, die für die Entwicklung eines mobilen AR-Systems hinsichtlich der Navigations- und zu einem gewissen Teil auch der Visualisierungskomponente relevant sind.

Die Bereitstellung von Informationen bezüglich der Navigation ist die Aufgabe die sich mit der Frage „Wie komme ich von A nach B?“ befasst. Der Anwender möchte nicht nur seinen momentanen Standpunkt wissen, sondern auch welchen Weg er nehmen muß um einen gewünschten Zielpunkt zu erreichen. Dafür ist es aber notwendig, dass der Nutzer dem System die entsprechenden Aufgaben zur Bearbeitung stellt. Wie dies nun im einzelnen zu geschehen hat, wird nachfolgend erörtert.

5.1 Augmented Reality

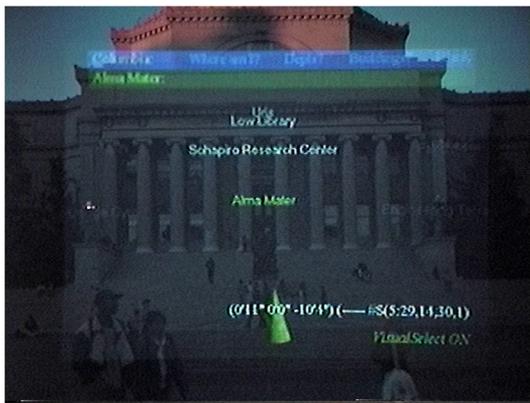
Der im folgenden und den vorigen Kapiteln häufig verwendete Begriff *Augmented Reality* bezeichnet eine Technik welche nach [Azuma 1997] folgende Eigenschaften besitzt:

- Sie verknüpft die physikalische mit einer virtuellen Welt
- Sie erlaubt Interaktion in Echtzeit
- Ihr Ergebnis präsentiert sich in 3D

Auf eine Übersetzung des Begriffs *Augmented Reality* wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Durch eine mögliche Übersetzung ins Deutsche wird seine Bedeutungen, welche das auch immer sein möge, keineswegs klarer. Nach [Bähr u. Schwender 1996] ist es nicht immer eindeutig welche Wörter zur Übersetzung in den verschiedenen Sprachen verwendet werden sollten, ohne Missverständnisse aufzuwerfen. Es ist somit nur möglich die Technik AR an sich zu beschreiben. Begriffe wie „Realität“ oder „Reale Welt“ werden in diesem Kontext ebenso vermieden, da diese durch jeden einzelnen unterschiedlich

gedeutet werden können, [Bähr u. Lenk 2002]. Stattdessen wird hierfür der Begriff *Physikalische Welt* verwendet. Sie stellt den menschlichen Lebensraum, die Natur, dar und enthält physikalisch beschreibbare Gegen- und Zustände.

Mit Hilfe von AR wird versucht die vom Menschen visuell wahrgenommene Umwelt durch computergenerierte, künstliche Objekte in ihrem Informationsgehalt und ihrer Verständlichkeit zu steigern. Dies geschieht, entsprechend der Definition, durch die Überlagerung korrespondierender Objekte in Echtzeit und durch Zutun des Benutzers in einer dreidimensionalen Umgebung.



(a) [Feiner u. a. 1997] ©1997 IEEE



(b) [Reitmayr u. Schmalstieg 2003]



(c) [Vlahakis u. a. 2002]

Abbildung 5.1: AR-Implementierungen aus dem Bereich der Touristeninformation

Eine erste Implementierung für eine Anwendung im Gelände zeigt Abbildung 5.1(a). Bei dieser Anwendung handelt es sich um ein Informationssystem, welches Besuchern Auskünfte über das Gelände eines Campus, Gebäude und den momentanen Standort liefert. Informationen werden entsprechend der Blickrichtung und Verweildauer dynamisch eingespiegelt. Die Interaktion erfolgt mittels eines in einem Tablet-PC integrierten Browsers. Ein AR basiertes Touristeninformationssystem ist in Abbildung 5.1(b) dargestellt. Durch die Verwendung eines Touchpads kann man mit dem System interagieren und sich Informationen bezüglich Gebäuden oder Plätzen in das Gesichtsfeld einspiegeln lassen. Außerdem dient es dem Anwender als Navigationshilfe in einer für ihn fremden Stadt. Ein weiteres System zur Führung von Touristen zeigt Abbildung 5.1(c). Es soll Besuchern

von Stätten mit Kulturdenkmälern die Möglichkeit bieten, sich den ursprünglichen Zustand der Objekte über die noch vorhandenen Ruinen blenden zu lassen und ergänzende Informationen über diese zu erfahren.

Abbildung 5.2 zeigt einen Ansatz zur Modellierung und Aufnahme von Objekten in Echtzeit im Gelände mit Hilfe von AR und der Verwendung von Datenhandschuhen.

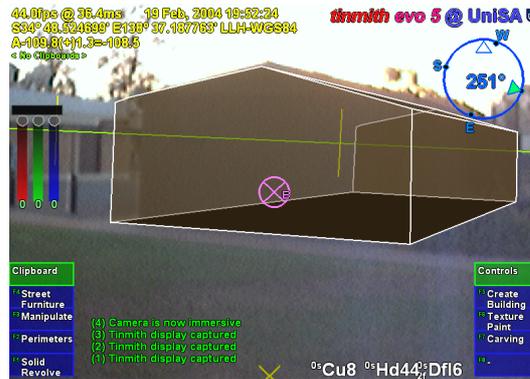


Abbildung 5.2: AR Ansatz zur Konstruktion von Gebäuden (Quelle: [Piekarski 2004]; Image courtesy: Dr. Wayne Piekarski)

Ein Beispiel für den Einsatz eines solchen Systems im militärischen Kontext ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Ziel ist es Soldaten beim Einsatz in urbanen Gebieten durch visuelle Informationen zu unterstützen. Dadurch erhalten diese Angaben über Gebäude, Kanäle oder Tunnelsysteme in denen sich nicht offenkundige Gefahren befinden können. Es dient folglich auch zur Steigerung der Sicherheit von Soldaten.

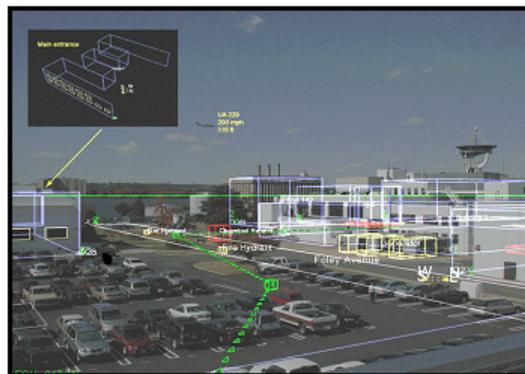


Abbildung 5.3: AR Ansatz aus dem militärischen Umfeld (Quelle: [Livingston 2006]; Image courtesy of the U.S. Naval Research Laboratory)

Die genannten Beispiele geben einen Einblick in die Möglichkeiten der Anwendungen im Gelände die sich durch AR ergeben.

5.2 Mensch-Maschine Interaktion (MMI)

Eine Definition der MMI (HCI *engl. für*: Human-Computer Interaction) lautet nach [AVM SIGCHI 2004] wie folgt:

***Human-Computer Interaction** is a discipline concerned with the design, evaluation and implementation of interactive computing systems for human use and with the study of major phenomena surrounding them.*

Sie ist somit Aufgabe mehrerer Disziplinen deren gemeinsames Ergebnis eine einzige Schnittstelle ist. Es reicht nicht aus eine solche Schnittstelle lediglich zu implementieren, was eigentlich der finale Schritt wäre. Vielmehr muß man sich darüber klar werden welche Funktionen sie erfüllen soll. Doch dafür ist es notwendig zu wissen welcher Anwendungsbereich sich, im Speziellen, dahinter verbirgt. Dies wiederum führt zu Grundprinzipien beim Entwurf des Systems, sowohl auf der Hard- als auch der Softwareseite, die es zu beachten gilt. Erst durch vorherige Betrachtung der Anforderungen wird es möglich, eine bestmögliche Schnittstelle zu implementieren.

Erste Untersuchungen (weitere Ausführungen zur geschichtlichen Entwicklung der MMI finden sich z. B. in [Myers 1998]) bezüglich der direkten Manipulation graphischer Objekte gehen auf [Sutherland 1963] zurück. Hier wurde ein Lichtgriffel, der durch die Entwicklung der ersten Computermaus durch [English u. a. 1967] ersetzt wurde, eingesetzt mit dem Objekte erfasst, verschoben und in ihrer Größe verändert werden konnten. Neben der Hardware entwickelten sich entsprechende graphische Systeme zum Zeichnen, Text erstellen oder für CAD (Computer Aided Design). Heutige Entwicklungen gehen in den Bereich Gestik- und Spracherkennung sowie Virtual Reality und Augmented Reality (VR/AR). Auf den Bereich mobiles AR baut sich im folgenden auch die Implementierung der Interaktion im allgemeinen und der Schnittstelle für die Navigation im speziellen auf. Daraus ergeben sich im einzelnen die folgenden Fragen:

- Welchem Bereich läßt sich eine solche Anwendung zuordnen?
- Welche Hardware kann eingesetzt werden?
- Welche Informationen sollen dargestellt werden?
- Welche Daten stehen zur Verfügung?

5.2.1 Die Frage nach der Einordnung in ein bekanntes Themengebiet

Von entscheidender Bedeutung ist die Art der Anwendung, die Zielgruppe und die Art der Trägerplattform, da darauf aufbauend entschieden werden muß welche Daten dargestellt werden sollen und auch welche Hardware verwendet werden kann. Weiterhin gilt es zwischen Systemen zu unterscheiden welche für Laborumgebungen bzw. den Gebrauch im Innenraum und für den Einsatz im Gelände konzipiert werden.

Ein mobiles AR-System so wie in diesem Kontext verwendet, läßt sich bis zu einem gewissen Teil in den Bereich der Fußgängernavigation im Gelände einordnen. Das Ziel eines solchen Systems ist es Einwohner von Städten oder Touristen ein Werkzeug bereitzustellen, mit dessen Hilfe sie sich in der Umwelt zurechtfinden, also navigieren oder Informationen über die nähere Umgebung des Standortes abfragen können. Im Bereich des Katastrophenmanagements ist ein solches System während jeder Phase des Zyklus zur Katastrophenbewältigung einsetzbar. Somit kann es zur Simulation vor, zur Unterstützung der Rettungsmannschaften nach einem Katastrophenfall und zur Wiederherstellung und Rekonstruktion verwendet werden.

Andere mobile Systeme wie z. B. die zur Fahrzeugnavigation stellen eine völlig andere Trägerplattform zur Verfügung und können demzufolge mit ganz anderen Techniken und Komponenten ausgestattet werden.

5.2.2 Hardware zur Interaktion

Bei mobilen Anwendungen im Gelände aus dem Bereich der Fußgängernavigation, gilt es die folgenden grundsätzlichen Kriterien bei der Auswahl der Geräte für die Ein- und Ausgabe zu beachten

- **Stromversorgung:** Geräte mit hohem Stromverbrauch und kurzer Akku-Laufzeit sind für den Einsatz im Gelände nicht geeignet,
- **Gewicht/ Größe:** Kleine, handliche Geräte sind schweren, ausladenden vorzuziehen,
- **Robustheit:** Die Geräte sollten, zumindest bis zu einem gewissen Maße, unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen wie Stößen oder Spritzwasser sein,
- **Preis:** Kostengünstigere Geräte werden von der breiten Masse bereitwilliger akzeptiert als teurere.

Im Besonderen gilt es bei der Wahl des Gerätes zur Visualisierung auf ein solches zurückzugreifen, dessen

- **Auflösung** die Darstellung der generierten Objekte auf eine verständliche Art und Weise erlaubt,
- **Wiederholrate** eine flüssige Animation gewährleistet,
- **Farbdarstellung** eine Differenzierung der künstlichen Objekte zulässt und
- **Fläche zur Visualisierung** groß genug ist, um mehrere verschiedenartige Element darstellen zu können.

Damit schränkt sich die Wahl der Ausgabegeräte bei AR stark ein und es steht als einzig sinnvolle Lösung lediglich das HMD (Head Mounted Display) zur Verfügung, welches auch die meisten der genannten Kriterien erfüllt.

Ganz andere Möglichkeiten bieten sich im Vergleich dazu bei Systemen zur Fahrzeugnavigation. Als Ausgabemedium werden hierbei zumeist TFT-Bildschirme oder Head-Up

Displays (HUD) verwendet. Diese bieten eine ausreichend große Visualisierungsfläche bei angemessener Farbdarstellung und Auflösung. Oben genannte Kriterien wie Stromversorgung oder Gewicht spielen in diesem Umfeld keine Rolle. Ein Nachteil ist allerdings, dass solche Systeme fest im Fahrzeug installiert werden müssen. Mobile Endgeräte hingegen sind zumeist PDAs (Personal Digital Assistant) mit integriertem oder externem GPS Modul oder aber auch Komplettlösungen welche sich hinter dem Akronym PNA (Personal Navigation Assistant) verbergen. Solche Lösungen, welche mehrere Komponenten in einem Bauteil vereinen, finden sich besonders im Sektor von privaten Anwendern aufgrund der relativ niedrigen Anschaffungskosten und der Einsetzbarkeit sowohl im Fahrzeug- als auch im Fußgängerbereich.

Neben der visuellen Ausgabe können auch akustische und selbst mechanische Reize eingesetzt werden. Akustische Signale werden oft dafür verwendet um dem Nutzer Statusinformationen über das System zu übermitteln (zum Beispiel: Ende eines systeminternen Vorganges oder Auftreten eines Fehlers). Die haptische Wahrnehmung hingegen wird zum Beispiel bei [Nojima u. a. 2002] vorgeschlagen, da hier davon ausgegangen wird, dass die Reaktionszeit des Anwenders auf visuelle und auditive Wahrnehmungen länger ist.

Bei der Wahl der Eingabegeräte stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Durch die Verwendung eines HMDs als Ausgabeplattform besteht die Möglichkeit beide Hände zur Bedienung der Eingabegeräte zu nutzen. Damit sind zum Beispiel Track-Ball, Touchpad, Spaceball oder Miniaturtastaturen vorstellbar, welche am Unterarm oder am Gürtel befestigt werden können. Verwendet man hingegen ein PDA zur Visualisierung, so kombiniert dieses bereits die Ein- und Ausgabe anhand eines Touchscreen. Der zusätzliche Gebrauch von anderen Eingabegeräten ist somit nicht erforderlich. Von Vorteil ist dies jedoch nicht, da sich der Anwender in diesem Fall ebenfalls um die korrekte Ausrichtung der Kamera, welche die physikalische Welt aufnimmt, kümmern muß damit eine sinnvolle Überlagerung entsteht. Somit wird die Bedienbarkeit eines solchen Systems nahezu unmöglich.

Eine gänzlich andere Möglichkeit beschreiben [Thomas u. Piekarski 2002], die zur Interaktion einen Datenhandschuh einsetzen. Dabei erfolgt die Steuerung über entsprechende Bewegungen der Finger. Jeder Finger, mit Ausnahme des Daumens, belegt dabei einen Menüpunkt, durch dessen Auswahl sich implementierte Untermenüs durchsuchen und Aktionen auslösen lassen.

Ein anderer Ansatz basiert auf der Interaktion aus dem Bereich Virtual Reality, vorgestellt von [Tanriverdi u. Jacob 2000]. Hierbei kann man anhand von Augenbewegungen, welche durch einen sogenannten *eye tracker* verfolgt werden, einen Cursor steuern und dadurch Objekte selektieren.

Bei Geräten aus dem Bereich der Fahrzeugnavigation wiederum kommen bei der Eingabe bevorzugt die Touchscreentechnologie oder auch Wertgeber und integrierte, einzelne Tasten zum Einsatz.

Einen abschließenden Überblick bezüglich der Verwendbarkeit der erwähnten Hardware in den einzelnen Anwendungsbereichen gibt Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Einsetzbarkeit der unterschiedlichen Hardware

Hardware	Fußgängernavigation	AR	Fahrzeugnavigation
TFT	-	-	+
HUD	-	-	+
PDA	+	+/-	+/-
HMD	+/-	+	-
Touchpad	+	+	+
Miniaturtastatur	+	+	+
Datenhandschuh	+/-	+-	-
Eye-Tracker	-	+	+
<i>+: besonders geeignet +/-: bedingt geeignet -: nicht geeignet</i>			

5.2.3 Gestaltung der Informationen

Zur Darstellung der Information existieren nach ISO9241-12, [Heinecke 2004], sieben charakteristische Eigenschaften, die es durch entsprechende Gestaltung der Ausgabe zu erreichen gilt. Diese sind im einzelnen:

1. **Klarheit:** Schnelle und zutreffende Vermittlung des Informationsinhaltes,
2. **Unterscheidbarkeit:** Die dargestellten Informationen können genau auseinandergehalten werden,
3. **Kompaktheit/ Prägnanz:** Nur die zur Erfüllung der Aufgabe erforderliche Information wird übermittelt,
4. **Konsistenz:** Gleichartige Information wird innerhalb der Anwendung gleichartig dargestellt, entsprechend den Erwartungen des Benutzers,
5. **Erkennbarkeit:** Die Aufmerksamkeit wird auf die benötigte Information gelenkt,
6. **Lesbarkeit:** Leicht zu lesende Information,
7. **Verständlichkeit:** Die Bedeutung ist klar zu verstehen, eindeutig, interpretier- und erkennbar.

Aus den angeführten Punkten lässt sich folgern, dass es bei der Gestaltung der entsprechenden Interaktions- sowie der eigentlichen Navigationselemente eine klare, strukturierte und übersichtliche Bereitstellung der Komponenten zu erzielen gilt. Auf zu sehr abstrahierte Elemente soll aus Gründen der Lesbarkeit und der Verständlichkeit verzichtet werden. Ein Beispiel für eine Bedienoberfläche bei der die genannten Aspekte kaum berücksichtigt wurden beschreibt [Hillenbrand 2004]. Hier sollte der Anwender sich auf einem Desktop, gestaltet als Wohnzimmer oder Scheune, zurechtfinden und durch die Auswahl von aus dem Alltag bekannten Symbolen, die von ihm gewünschten Funktionen aufrufen können. Dies führte jedoch dazu, dass sich zum einen die Anzeige unübersichtlich gestaltete. Der Nutzer konnte zwischen auswählbaren Symbolen und solchen, welche rein dekorative Zwecke erfüllten nicht ohne weiteres unterscheiden. Zum anderen war es nur bedingt möglich,

Zusammenhänge zwischen den Symbolen und den sich dahinter verbergenden Funktionen zu erkennen.

Gerade durch den Einsatz eines HMD oder PDA, mit ihren limitierenden Eigenschaften (Gesichtsfeld/ Darstellungsbereich, Farbe usw.) wird es notwendig, dass die auf visueller Wahrnehmung basierenden Elemente gut erkennbar und verständlich gehalten werden. Im Bereich von AR werden deshalb Informationen hauptsächlich mittels Symbolen und stichwortartigem Text ausgegeben. Dies setzt jedoch entsprechendes Grundwissen im Umgang mit dem System voraus, damit zugleich der Nutzen entsprechend hoch ist.

In [Preim 1999] finden sich entsprechende Entwurfsprinzipien die beim Aufbau eines GUI (Graphical User Interface) zu beachten sind und deren Beachtung es dem Nutzer erleichtern sollen mit dem System zu interagieren. Ein erstes Beispiel für die Implementierung eines GUI auf einem Display mit begrenzter Anzeigefläche wird von [Rekimoto 1996] vorgestellt. [DiVerdi u. a. 2003] präsentieren einen fensterbasierten Ansatz in 3D mit Zugriffsmöglichkeiten via Maus oder Tastatur.

5.2.4 Anordnung der Interaktionselemente

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die Verteilung der Steuerkomponenten über den Bereich der Anzeige. Bei der Implementierung muß darauf geachtet werden, dass bei späterer Anwendung Nachrichten und Informationen in der Nähe des primären Blickpunktes des Nutzers erscheinen. Im Falle von AR ist dies verstärkt die untere Hälfte des Bildschirms, da hier zumeist nicht sichtbare Objekte in der Nähe, über oder unter, der Erdoberfläche eingespiegelt werden. Nach [Rauterberg u. Cachin 1993] sollen relevante Informationen auf einem 14" ($\approx 355,6mm$) Display nicht weiter als 3" ($\approx 76,2mm$) von diesem Bereich entfernt eingeblendet werden. Demzufolge sollen Funktionen welche häufig gebraucht werden, auch im unteren Bereich des Bildschirms zu finden sein. Dadurch verringern sich die notwendigen Augbewegungen über den Anzeigebereich, womit sich außerdem die Zeit bis zum Auffinden der gewünschten Informationen verkürzt. Hingegen sollten weniger oft verwendete Informationen erst gar nicht angezeigt, da sie beim Erscheinen ohnehin den Fokus des Betrachters auf sich ziehen, oder unauffällig am Rand oder den Ecken des Bildschirms platziert werden.

Abbildung 5.4 stellt den beschriebenen Sachverhalt graphisch dar. Geht man davon aus, dass der Horizont die Anzeige in zwei gleichgroße Hälften teilt, so lassen sich die Interaktionselemente theoretisch bis zur Linie D_{max} darstellen. Der Abstand zum Horizont beträgt dabei 3". Da sich der Bereich, auf den der Anwender seinen Fokus richtet, jedoch in den meisten Fällen etwas unterhalb des Horizonts befindet, so lassen sich diese Elemente im dargestellten Bereich bis zur unteren Bildschirmbegrenzung einblenden. Der obere Bildrand hingegen kann aufgrund seiner geringen Beachtung bis zu einem gewissen Grad mit Statusinformationen gefüllt werden. Der dynamische Bereich hingegen sollte frei von jeglichen Zusatzeinblendungen sein oder nur temporär verwendet werden, um bei Kopfbewegungen ausreichend Raum für die Überlagerung zur Verfügung stellen zu können.



Abbildung 5.4: Aufteilung der Anzeige bei AR

5.2.5 Festlegung der Datenbasis

Welche Daten sinnvollerweise für die Visualisierung herangezogen werden können, ist zum einen abhängig von der Art des gewählten Ausgabegerätes und damit zum anderen von der Art der Navigation. Aus Tabelle 5.1 ergeben sich demnach die folgenden Kombinationen aus Einsatzgebiet und Visualisierungsmedium:

Fußgängernavigation ↔ PDA
 AR ↔ HMD
 Fahrzeugnavigation ↔ HUD

Tabelle 5.2 stellt darauf zurückgreifend die Anwendbarkeit unterschiedlicher Objektgeometrien in 3D und Darstellungsobjekte bei Verwendung des jeweils „optimalen“ Ausgabegerätes dar.

Tabelle 5.2: Einsetzbarkeit unterschiedlicher Daten

Daten	Fußgängernavigation	AR	Fahrzeugnavigation
Punkte	+	+	+
Linien	+	+	+
Oberflächen	+/-	+	-
Volumina	-	+	-
Primitive	+/-	+	-
Text	+	+	+
Symbole	+	+/-	+
Karten	+	+/-	+
<i>+: besonders geeignet +/-: bedingt geeignet -: nicht geeignet</i>			

Es fällt auf, dass jede gängige 3D-Objektgeometrie für die Visualisierung in AR geeignet ist. Dies ist damit zu erklären, dass es sich hierbei um einfache und abstrahierte Formen handelt, welche bei AR ausreichend sind. Eine Sonderstellung nehmen hierbei die Oberflächen und Primitive ein. Diese erfüllen bei AR eine zweite, essentielle Aufgabe. Nach [Coelho 2004] werden Modelle aus Primitiven sowie Digitale Oberflächenmodelle (DOM), wie sie beispielhaft in Abbildung 5.5 dargestellt sind, zur Berechnung der Tiefeninformationen verwendet. Die so gewonnenen Informationen erlauben es dem System die Visualisierung noch realer zu gestalten, indem die Verdeckung berücksichtigt wird.

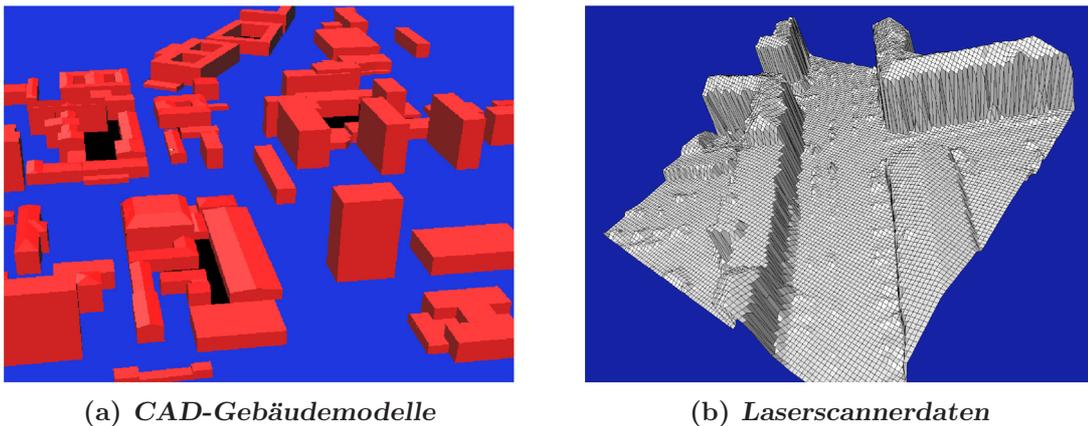


Abbildung 5.5: Daten zur Tiefenberechnung nach [Coelho 2004]

Weiterhin können Oberflächen, wie in Abbildung 5.6 dargestellt, zumindest näherungsweise, neben der Visualisierung für die Berechnung kürzester Wege verwendet werden.

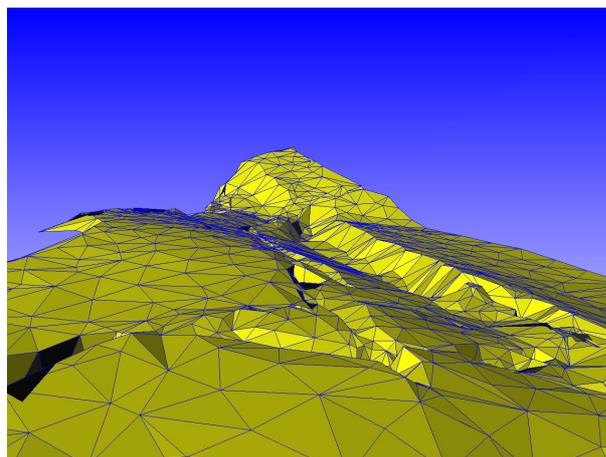


Abbildung 5.6: Visualisierbares Dreiecksnetz

Bei der Fußgänger- und Fahrzeugnavigation hingegen, ist eine Beschränkung auf Punkte und Linien sinnvoll, da hier die Darstellung von Karten und Symbolen im Vordergrund steht. Dies ist bei AR nur bedingt der Fall. Bei allen drei Navigationsarten bietet die Einblendung von erklärenden Textelementen eine zusätzliche Möglichkeit Informationen aufzuwerten und dem Anwender den Umgang mit dem System zu erleichtern.

Unabhängig von der Form gilt es grundsätzlich zu gewährleisten, dass die Daten hinsichtlich Aktualität, Qualität und Verfügbarkeit den spezifischen Ansprüchen genügen. Um dies zu garantieren, sollten die Daten stets mit kleinstmöglicher Redundanz gehalten werden. Damit sinkt zum einen der verwaltungstechnische Aufwand der Datenhaltung. Zum anderen reduziert sich für das mobile System die Anzahl der notwendigen Anfragen, und somit die Wartezeit, bis zum Erhalt der gewünschten Information. Andererseits bietet eine redundante Abdeckung eines Gebietes mit Sendern zur Verteilung der Daten die Möglichkeit Empfangslücken zu überbrücken. Nach [Bähr 2005] ist Redundanz bei technischen Systemen immer von Vorteil.

Zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Informationen ist es letztlich jedoch unumgänglich noch weitere Daten zu verwenden. Hierzu zählen:

- **Wegenetze** einschließlich Geometrie und Topologie,
- **Identifikationsmerkmale** wie Straßennamen, Hausnummern, Ortsbezeichnungen usw.,
- **Infrastruktur** wie z. B. Gas, Wasser, Telefon usw.,
- **Thematische Daten** also Sachinformationen zu einzelnen Objekten und Objektgruppen,
- **Bilder** in der Form von Luftbildern oder Nahbereichsaufnahmen und
- **Sonstiges**, was alle sonst nicht sichtbaren Informationen wie Telefonnummern, Öffnungszeiten oder Gebäudepläne enthält.

5.2.6 Kriterien der MMI

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass von entscheidender Bedeutung die Wahl der Trägerplattform ist, die in direkter Verbindung mit dem Anwendungsszenario steht. Bei der Fußgängernavigation sind Handlichkeit und Robustheit eines Systems primäre Entscheidungskriterien, da der Nutzer die Komponenten direkt am Körper befestigen bzw. mitführen muß. Das Gesamtsystem muß so aufgebaut sein, dass es den Anwender in seiner Bewegungsfreiheit so wenig wie möglich einschränkt.

Bei der Frage der Interaktion ist eine verständliche, übersichtliche und klare Gestaltung der Bedienelemente unerlässlich mit denen er sich schnell vertraut machen kann. Auch sollte der Nutzer vor einer Informationsflut bewahrt, und stattdessen essentielle Informationen in den Vordergrund gerückt werden.

Die zu verwendenden Daten sollten in einem ausreichenden Mindestumfang bereits auf dem mobilen Endgerät gespeichert sein. Dadurch ist ein permanenter Informationsfluß sichergestellt und auch in schwierigem Gelände der Nutzer mit notwendigen Daten versorgt. Als zusätzliche Datenquellen bieten sich LBS an mit denen standpunktspezifische Informationen abgefragt und die bereits mitgeführten Daten verbessert werden können.

5.3 Medien für die Ein- und Ausgabe

Dieser Abschnitt gibt einen Einblick in die während der Entwicklungsphase entworfene und implementierte Ein- bzw. Ausgabeschnittstelle. Dabei wird zunächst die dem Nutzer zur Verfügung gestellte Eingabeschnittstelle vorgestellt und mit einer klassischen, meist fensterbasierten, verglichen. Anschließend wird ein kurzer Überblick über die visualisierbaren und verwendeten Datenformate gegeben und vorgestellt, welche Aufgaben diese Daten erfüllen. Abschließend wird beschrieben wie dies in eine virtuelle Szene gelangen und in wie weit die Vorgaben einer MMI durch den entwickelten Ansatz erfüllt werden.

5.3.1 Definition

In Bezug auf die MMI, ist der Begriff *Medien* von zentraler Bedeutung und nach [DIN 2002] wie folgt definiert:

Medien sind verschiedene spezifische Darstellungsformen von Informationen für den Benutzer.

Als Beispiele hierfür können Text, Video, Grafik, Animation oder Audio genannt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere Medien in Form von Texten für die Eingabe verwendet. Der Grund hierfür ist, dass hierdurch dem Nutzer mittels eindeutiger Begriffe und Umschreibungen der Umgang mit dem System ermöglicht werden kann. Ähnliches gilt für die Ausgabe. Auch hier wird der Fokus auf eine verständliche und eindeutige Darstellung der Elemente gerichtet.

5.3.2 Die Eingabeschnittstelle

Aufbauend auf den Funktionalitäten einer bereits entwickelten Schnittstelle zur Interaktion für ein kamerabasiertes AR-System, wurde ein Ansatz implementiert der auch bei der Verwendung eines HMDs einsetzbar ist. Anstatt einer reinen, komplexen WIMP (Windows, Icons, Menus and Pointing Device)-GUI wird am unteren Rand des Displays eine Auflistung mit möglichen Tastaturkürzeln zur Steuerung des Systems eingeblendet. Lediglich vorhandene, vielschichtige Elemente werden unverändert übernommen. Dieser Ansatz besitzt mehrere Vorteile gegenüber einer klassischen, rein fensterbasierten Schnittstelle. Anschaulich zeigt dies der Vergleich in Abbildung 5.7. Die fensterbasierte Lösung verdeckt einen Großteil der eigentlichen Szene im Visualisierungsfensters, was bei AR sehr von Nachteil ist. Außerdem wird bei einer solchen Lösung der Fokus des Benutzers nicht auf einen kleinen Ausschnitt des Bildschirms oder ein bestimmtes Bedienelement fixiert. Doch genau dies würde die Entscheidungsfindung hin zur Ausführung eines Interaktionsschrittes beschleunigen. Vielmehr muß er sich zunächst auf der Oberfläche des GUI zurechtfinden, da eine klare, übersichtliche Linie in deren Aufbau nicht vorhanden ist. Anders präsentiert sich die Steuerung rein über Tastatureingabe. Hier wird auf sonst typische Bedienelemente wie Knöpfe, Reiter oder Menüs verzichtet und stattdessen für jedes Tastaturkürzel eine eindeutige, stichwortartige Erklärung eingeblendet. Der Nutzer kann

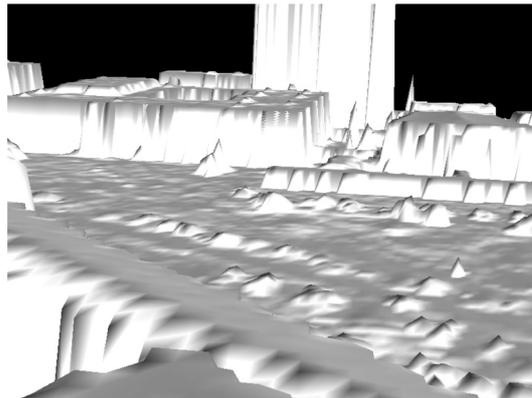
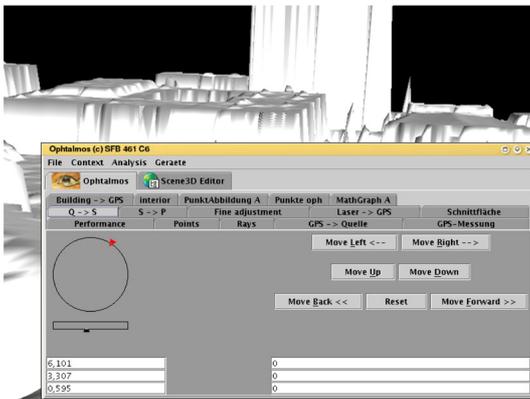
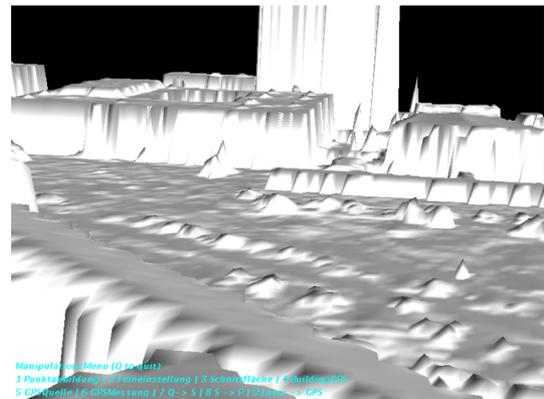
(a) *Szene ohne Interaktionselemente*(b) *Fensterbasierte Interaktion*(c) *Textbasierte Interaktion*

Abbildung 5.7: Vergleich von fensterbasierten und textbasierten Interaktionselementen

sich auf den geschriebenen Text zur Steuerung konzentrieren ohne, dass er durch nicht benötigte Einblendungen abgelenkt wird. Das Visualisierungsfenster wird für die Einspielung der künstlichen Objekte frei gehalten wodurch gleichzeitig die Interaktion und die Überlagerung zur Verfügung stehen.

Abbildung 5.8 zeigt die angebundene Tastatur. Es handelt sich hierbei um eine am Unterarm zu befestigende, verkleinerte PC-Tastatur. Durch ihre kompakte und robuste Bauweise schränkt sie den Nutzer in dessen Bewegungsabläufen nicht ein und ist zudem für den Außeneinsatz geeignet.

Die Kontrollen im Überblick

Die gesamten Kontrollen der Tastatursteuerung lassen sich in fünf Gruppen unterteilen, vergleiche Abbildung 5.9. *File* stellt globale Dateioperationen zur Verfügung und ermöglicht das Schließen des Hauptprogramms. Unter dem Menüpunkt *Kalibrierung* finden sich Methoden zur Kalibrierung des Systems, welche von den jeweils verwendeten Sensoren abhängig sind. *Manipulation* erlaubt es die dargestellten Objekte zu bewegen



Abbildung 5.8: Unterarmtastatur nach [L3 SYSTEMS 2005]

und Transformationsparameter zu verändern. Dies geschieht unabhängig von den Sensormesswerten. Es wird also lediglich die Blickrichtung geändert. Diverse, implementierte Ausgleichsalgorithmen befinden sich im Menü *Ausgleichung*. Diese können bei Bedarf zur Laufzeit des Systems aufgerufen werden. Der *3DEditor* dient dazu verschiedene, zusätzliche Funktionen bereitzustellen und zu bündeln. Hierzu zählt die Veränderung der grafischen Attribute der visualisierten Objekte (*engl.: Appearance*) und die Erzeugung von Berichten und Polygonen, sowie die Anpassung der dargestellten Displaykomponenten zur Interaktion.



Abbildung 5.9: Menü-Hierarchie zur tastaturgesteuerten Interaktion

Einige Kontrollen können aufgrund ihres hohen Grades an Komplexität jedoch nicht rein tastaturbasiert gesteuert werden. Hierzu zählt beispielsweise die Manipulation der grafischen Attribute von Objekten, wofür Abbildung 5.10 ein Beispiel zeigt. Für diese wird auch weiterhin auf eine fensterbasierte Lösung zurückgegriffen. Der dadurch aufkommende, unvermeidliche Nachteil der Verdeckung des eigentlichen Anzeigenbereichs wird dabei in Kauf genommen. Es ist in diesem Zusammenhang davon auszugehen, dass eine solche Kontrolle nur für sehr kurze Zeit visualisiert und vom Anwender bewusst aufgerufen wird.

5.3.3 Datenformate für die Ausgabe

Zur Visualisierung von dreidimensionalen Szenen, Modellen oder Animationen existieren eine Reihe unterschiedlicher, mehr oder weniger verbreitete, Grafik-Dateiformate. Zwei

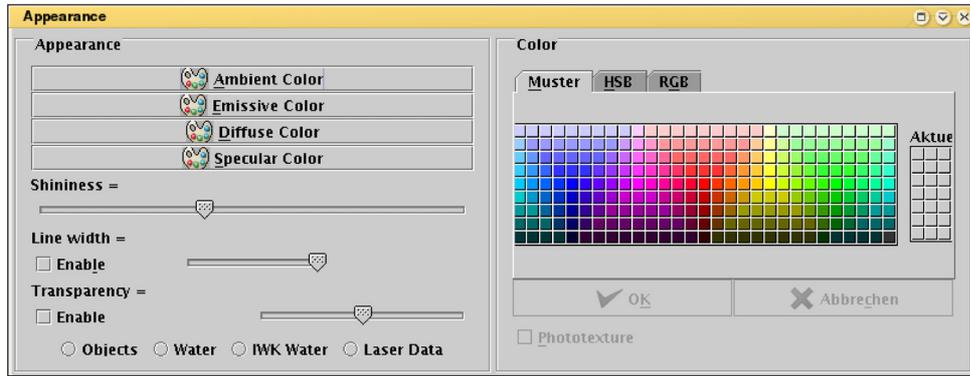


Abbildung 5.10: Komplexes Interaktionselement

wichtige Vertreter aus dem Bereich der 3D Visualisierung sind VRML (Virtual Reality Modelling Language) und dessen Nachfolger X3D (Extensible 3D) [Web3D Consortium 2005]. Durch ihren interaktiven Charakter und ihren leicht verständlichen Aufbau, eignen sie sich besonders im Einsatz mit AR.

VRML bzw. VRML97 ist ein Sprachstandard (Makrosprache) zur Darstellung interaktiver 3D-Web-Grafiken. Durch die Verabschiedung von X3D als ISO-Standard im Jahre 2004, soll langfristig VRML97 ersetzt werden. X3D bietet den Vorteil, dass neben der klassischen VRML Schreibweise, auch die Option besteht, die Dateien in XML (Extensible Markup Language) oder Binär zu kodieren. Dadurch wird der Datenaustausch mit anderen Anwendungen unkomplizierter und es besteht sogar die Möglichkeit sicherheitsrelevante Daten zu verschlüsseln. Weiterführende Informationen bzgl. dem X3D Standard, dessen Anwendung usw. finden sich unter [Web3D Consortium 2005].

Die künstlichen Objekte die zur Visualisierung herangezogen werden, können unterschiedliche Abstraktionsstufen aufweisen. Weil die Einspiegelung der Objekte bei einem ARS nicht zwingend auf photorealistische Art und Weise geschehen muß, reichen meist schon vereinfachte Darstellungsformen aus. Dies stützt sich auf den Tatsachen, dass zum einen die virtuellen Modelle lediglich der Steigerung des Informationsgehaltes der Szenen dienen und sie die Umgebung nur in geringem Maße überdecken sollen. Zum anderen würde der damit verbundene Rechenaufwand für das mobile System zu groß werden. Diese Voraussetzungen bei der Überlagerung, helfen auch bei der Wahl der Navigationselemente. Klare, leicht verständliche Symbole wie einzelne 3D Grafikprimitive (Abbildung 5.11)



Abbildung 5.11: 3D Grafikprimitive

oder zusammengesetzte wie Pfeile oder Polygone erleichtern es dem Nutzer sich in der Natur zurecht zu finden. Für den Entwickler hingegen wird es möglich, solche Objekte mit wenig Aufwand, selbst in Echtzeit, zu erzeugen.

5.3.4 Die virtuelle Szene

Zur Erzeugung der virtuellen Szene wird Java3D und die dort vorgehaltene Szenengraphenarchitektur verwendet. Durch verschiedenste, in Java programmierte, Loader-Klassen-Bibliotheken besteht die Möglichkeit, Dateien unterschiedlichster Formate zu laden. Unter [Java3D 2005] findet man eine Tabelle, die alle relevanten Informationen zu den aktuellen Loadern auflistet.

Um nun VRML97 oder X3D Dateien laden und visualisieren zu können, benötigt man eine speziell diese Formate unterstützende Bibliothek. Eine davon findet sich unter [Xj3D 2005] die beide Formate unterstützt. Dabei werden die Modelle aus der entsprechenden Datei gelesen und in einer Szene abgelegt. Diese wird dann mittels JAVA3D in den Szenengraphen eingefügt.

Das Schreiben einer geladenen Szene hingegen wird bei dieser Bibliothek nicht unterstützt. Dafür gibt es andere, wie zum Beispiel [CX3D 2005] die allerdings eine andere Szenengraphenarchitektur als die in Java3D übliche verwendet. Mit dieser ist es möglich bereits existierende Szenen zu manipulieren und somit neue zu generieren, die dann ebenfalls geladen werden können. Dieses Vorgehen bietet sich an, will man die Daten ausdünnen oder für weitere Verarbeitungsschritte aufbereiten.

5.3.5 Überprüfung der Vorgaben zur MMI

Die hier beschriebene Vorgehensweise enthält die vorgegebenen Grundzüge, welche es bei der Gestaltung einer Schnittstelle zur MMI zu beachten gilt. Alle in Abschnitt 5.2.3 angegebenen Aspekte zur Gestaltung der Informationen werden berücksichtigt. Insbesondere werden Klarheit und Unterscheidbarkeit betont, sowie auf überflüssige Informationen oder gar Animationen verzichtet. Durch die Verwendung von VRML97, respektive X3D Dateien wird dies zusätzlich unterstützt, da sich die künstlichen Objekte lediglich aus simplen Geometrieobjekten zusammensetzen.

Welche Elemente tatsächlich für die Ein- und Ausgabe implementiert werden sollen hängt zum größten Teil von den Anwendern und der zu bearbeitenden Aufgabe ab. Bei der Navigation, die im Rahmen dieser Arbeit im Vordergrund steht, ist die Darstellung von solchen Elementen essentiell, welche den Anwender beim Zurechtfinden im Gelände unterstützen. Die in diesem Abschnitt 5.3 vorgestellten Komponenten geben einen Überblick bezüglich Steuerungs- und Visualisierungskomponenten. Konkrete Implementierungen, welche den Anwender bei der Navigation im Gelände und in Echtzeit unterstützen sollen, zeigen die nachfolgenden Abschnitte.

5.4 Kürzeste Wege

Die Möglichkeit zur Berechnung und Visualisierung kürzester Wege zwischen n Punkten, stellt bei allen Navigationssystemen eine Lösung dar, mit welcher der Nutzer bei der Navigation im Gelände unterstützt werden kann. Insbesondere durch die Verwendung von Augmented Reality können berechnete Routen direkt in das Gesichtsfeld des Nutzers

und somit direkt in die Natur eingespiegelt werden. Ein Zurechtfinden in Karten und das Übertragen in die Natur entfällt.

Bei der Kürzesten-Wege-Problematik wird je nach Anzahl n der Punkte zwischen unterschiedlichen Problemen unterschieden. Dies sind die Folgenden:

1. **All Pairs Shortest Path** (APSP): Gegeben ist ein Graph $G = (V, E, c)$. Berechnet werden die kürzesten Verbindungen zwischen allen Knoten $i, j \in V$ entlang der Kanten E mit den Längen c . Zum Beispiel: Kürzeste Entfernung zwischen allen deutschen Großstädten,
2. **Single Source Shortest Path** (SSSP). Gegeben sind ein Graph $G = (V, E, c)$ und ein Anfangsknoten $a \in V$. Berechnet werden die kürzesten Wege zwischen a und allen anderen Knoten $j \in V - \{a\}$. Zum Beispiel: Kürzeste Entfernung zwischen Karlsruhe und allen anderen deutschen Großstädten,
3. **Single Pair Shortest Path** (SPSP). Gegeben sind ein Graph $G = (V, E, c)$ sowie zwei Knoten $a, e \in V$. Berechnet wird der kürzeste Weg zwischen a und e . Zum Beispiel: Kürzeste Entfernung zwischen Karlsruhe und Frankfurt.

In den nächsten Abschnitten werden zunächst einige Grundlagen und Begriffe aus dem Bereich der Informatik präsentiert. Diese sollen zum Verständnis der im Anschluss daran beschriebenen implementierten Lösung beitragen.

5.4.1 Komplexität und Prioritätswarteschlange

In der Informatik versteht man unter der Komplexität eines Algorithmus seinen maximalen Ressourcenbedarf. Hierunter fallen insbesondere die Zeit-, Platz- und Beschreibungskomplexität. Die algorithmische Komplexität, dargestellt durch die Funktion $f(n)$, beschreibt nun wieviele Schritte ein Algorithmus zur Lösung eines Problems, in Abhängigkeit von der Länge n der Eingabe, benötigt. Um nun eine Darstellung unabhängig von der Implementierung und dem verwendeten Rechner zu erreichen verwendet man die *Notation*. Diese beschreibt die maximale Rechenzeit, welche zur Lösung eines Algorithmus benötigt wird. Man untersucht hierbei immer die eigentliche Laufzeit im ungünstigsten Fall, dem sogenannten „worst case“. Es wird zu diesem Zweck eine asymptotische obere Schranke bestimmt. \mathcal{O} ist eines der Landauschen Symbole und ist mathematisch (vgl. z. B. [Heun 2003]) wie folgt definiert:

$$\mathcal{O}(f) := \{g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+ : \exists c \in \mathbb{R}. c > 0, n_0 \in \mathbb{N} : \forall n \in \mathbb{N}. n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

Dies bedeutet, dass ab einer gewissen Anzahl von $n \geq n_0$, $g(n)$ höchstens so schnell wächst wie $f(n)$. Daraus ergeben sich z. B. folgende, häufig auftretenden maximalen Rechenzeiten:

- **linear:** $f(n) = \mathcal{O}(n)$
- **quadratisch:** $f(n) = \mathcal{O}(n^2)$

- **logarithmisch:** $f(n) = \mathcal{O}(\log(n))$
- **exponentiell:** $f(n) = \mathcal{O}(c^n)$

Abbildung 5.12 stellt die unterschiedlichen Verhalten der erwähnten Komplexitäten für $n = 50$ und $c = 2$ graphisch dar.

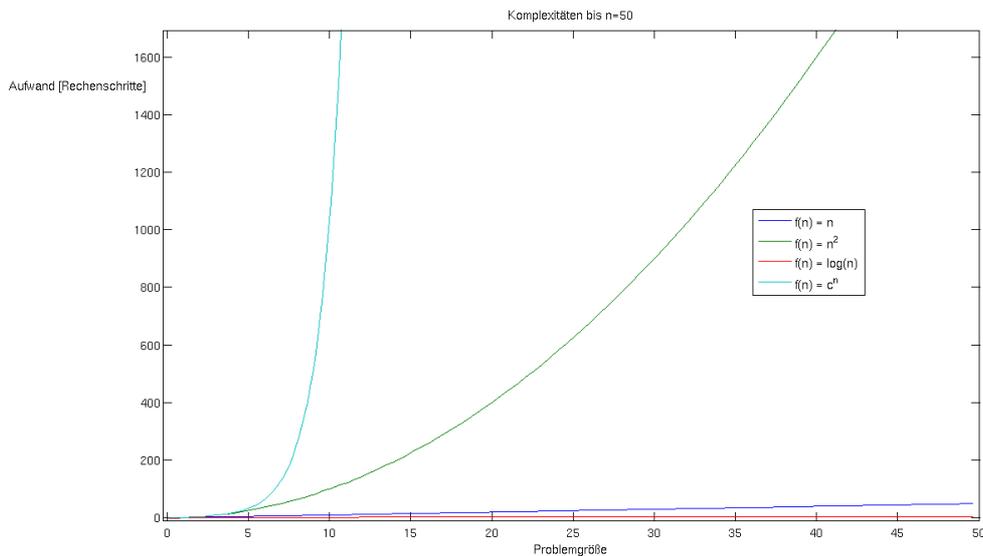


Abbildung 5.12: Unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten von $f(n)$

Eine Prioritätswarteschlange (engl.: Priority Queue) ist eine Datenstruktur, deren Elemente Schlüssel besitzen welche die Reihenfolge der Abarbeitung festlegen. Eine Möglichkeit Priority Queues effizient zu realisieren, bietet die Verwendung von Radix Heaps. Dabei wird die amortisierte Laufzeit der langsamsten Zugriffsfunktion auf $\mathcal{O}(\log C)$ verbessert (bei 2-level Buckets beträgt diese $\mathcal{O}(\sqrt{C})$). C bezeichnet hierbei die Differenz zwischen maximalem und minimalem Schlüssel. Die notwendigen Buckets zur Verwaltung der Elemente im Heap sind hier nicht von konstanter, sondern von exponentiell wachsender Größe. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 5.13.

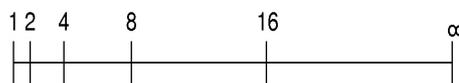


Abbildung 5.13: Initialisierter, leerer Radix Heap

Die Anzahl der Buckets B berechnet sich allgemein nach:

$$B = \log(C + 1) + 1.$$

Für die Bucketgrenzen u wiederum gilt:

$$u[i] = \begin{cases} 0 & \text{für } i = 0 \\ 1 & \text{für } i = 1 \\ u[i-1] + 2^{i-2} & \text{für } 2 \leq i \leq B-1 \\ \infty & \text{für } i = B. \end{cases}$$

Als Operationen stehen zur Verfügung:

- *Initialize*: Erzeuge leere Buckets B und erzeuge deren Grenzen $u[i]$
- *Insert*(h, x): Füge neues Element x mit vordefiniertem Schlüssel in Heap h ein.
- *DecreaseKey*($h, x, wert$): Ersetze den Schlüssel des Elements x im Heap h durch $wert$. $wert$ muß kleiner sein als der zu ersetzende Schlüssel von x .
- *ExtractMin*(h): Finde Element mit minimalem Schlüssel in Heap h , lösche es aus h und gib es zurück.

Ein Beispiel für einen exemplarisch gefüllten Heap zeigt Abbildung 5.14. Zu erkennen ist, dass die Schlüssel, entsprechend ihrer Werte in den dazugehörigen Buckets abgelegt wurden.

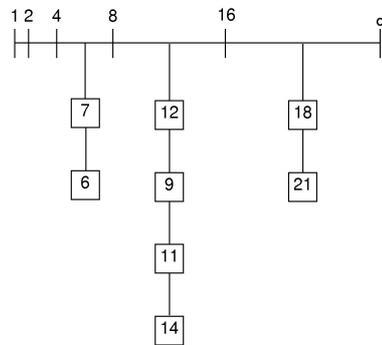


Abbildung 5.14: Gefüllter Heap

Die Arbeitsweise der genannten Operationen *Insert*, *DecreaseKey* und *ExtractMin* verdeutlicht Abbildung 5.15.

5.4.2 Algorithmen zur Lösung der Kürzesten-Wege-Problematik

Diese Aufgaben, die ursprünglich aus der Graphentheorie der Informatik stammen, besitzen jeweils unterschiedliche Lösungsansätze. Einige von diesen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Floyd-(Warshall-)Algorithmus Dieser Algorithmus löst das APSP-Problem. Seine Ursprünge besitzt er in den Untersuchungen von [Floyd 1962] und einem sehr ähnlichen Algorithmus nach [Warshall 1962] der den Floyd-Algorithmus geringfügig modifiziert. Die Idee hierbei ist es einen neuen Graphen zu konstruieren, in welchem alle Knoten miteinander eine direkte Verbindung besitzen. Dazu werden alle Knoten betrachtet und untersucht ob direkte Verbindungen zu den benachbarten Knoten existieren. Ist dies nicht der Fall oder ist der Aufwand über angrenzende Knoten geringer als der bestehende, so wird der entsprechenden Kante die Summe des Aufwands zugewiesen. Der Ergebnisgraph enthält jedoch keinerlei Informationen mehr über die Kantenabfolgen. Es ist somit nicht

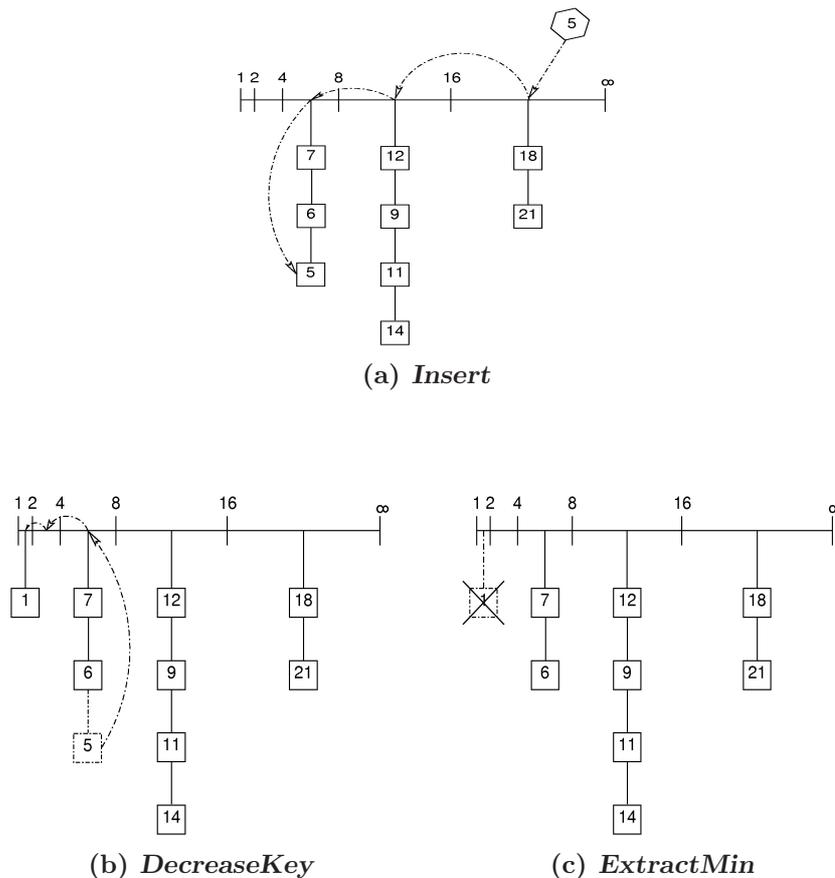


Abbildung 5.15: Heap Operationen

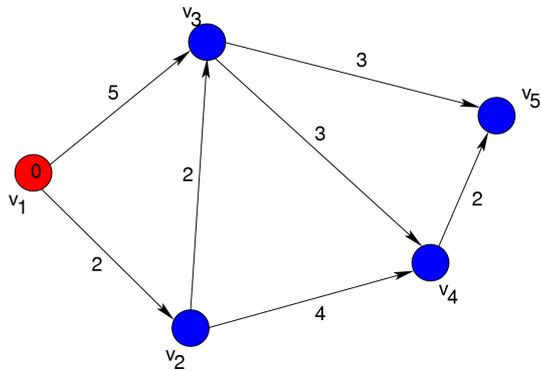
mehr nachvollziehbar, ob es sich bei einem Aufwand um den ursprünglichen oder um eine modifizierten Wert handelt. Die maximale Rechenzeit dieses Algorithmus beträgt $\mathcal{O}(n^3)$.

Dijkstra Algorithmus Für die Lösung des SSSP-Problem bietet sich der Algorithmus nach [Dijkstra 1959] an. Bei der Bestimmung der kürzesten Wege wird bei jedem Iterationsschritt der Knoten ermittelt, welcher sowohl noch nicht berücksichtigt wurde, als auch zum Ausgangsknoten den geringsten Aufwand aufweist. Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Dijkstra Algorithmus ist jedoch, dass es sich bei dem zu untersuchenden Graphen um einen gerichteten mit nicht negativen Kantengewichten handelt. Beispielhaft zeigt Abbildung 5.16 den Ablauf des Algorithmus für den Graphen $G = (V, E, c)$.

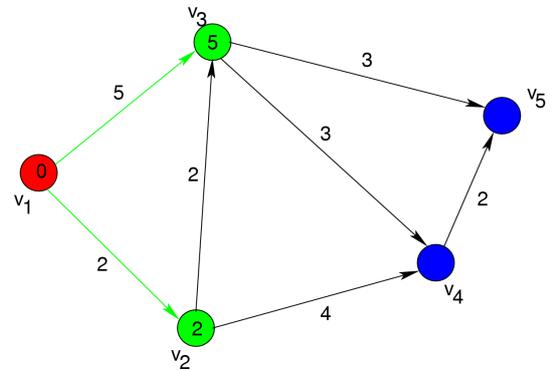
Es gilt:

$$\begin{aligned}
 V &= \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \\
 E &= \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_2, v_3), (v_2, v_4), (v_3, v_4), (v_3, v_5), (v_4, v_5)\} \text{ und} \\
 c(v_1, v_2) &= 2, \quad c(v_1, v_3) = 5, \quad c(v_2, v_3) = 2, \quad c(v_2, v_4) = 4, \\
 c(v_3, v_4) &= 3, \quad c(v_3, v_5) = 3, \quad c(v_4, v_5) = 2
 \end{aligned}$$

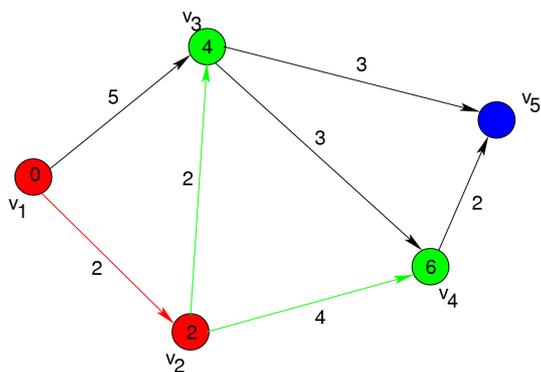
Die Knoten des Beispielgraphen sind entsprechend ihres Bearbeitungsstandes eingefärbt. Ein rot gefärbter Knoten ist bereits, ein grüner wird gerade und ein blauer ist bislang



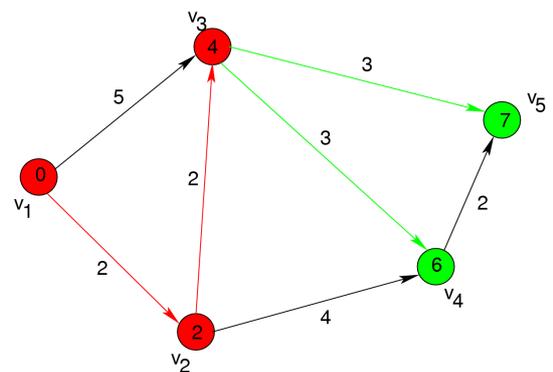
(a) 1. Schritt



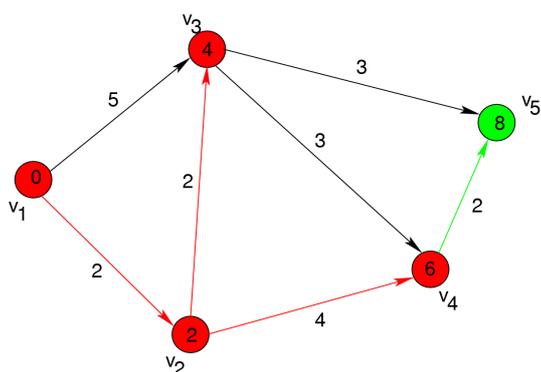
(b) 2. Schritt



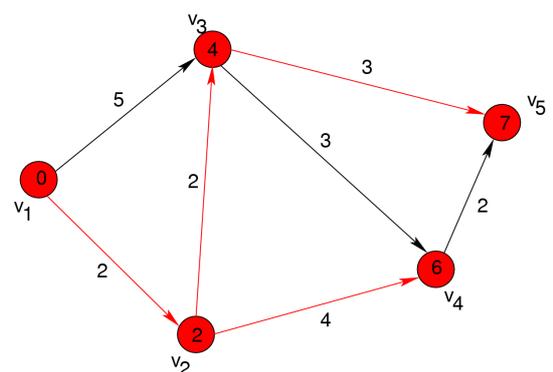
(c) 3. Schritt



(d) 4. Schritt



(e) 5. Schritt



(f) 6. Schritt

Abbildung 5.16: Beispiel zum Dijkstra Algorithmus

noch nicht bearbeitet worden. Bei den Kanten verhält sich die Färbung analog, bis auf die Tatsache, dass eine schwarze Kante entweder noch nicht bearbeitet wurde oder sie für einen kürzesten Weg nicht in Betracht gezogen wird. Dies läßt sich jedoch auch anhand des Iterationsfortschrittes leicht erkennen.

Beim Dijkstra Algorithmus handelt es sich außerdem um einen *Greedy-Algorithmus*, das heißt, dass die jeweils gewählten optimalen Teillösungen in ihrer Gesamtheit eine optimale Lösung für das Problem ergeben. Seine Komplexität beträgt $\mathcal{O}(n^2)$.

A*-Algorithmus Dieser Algorithmus nach [Hart u. a. 1968], bietet eine Lösung des SPSP-Problem, unter der Verwendung von Heuristik, an. Die Laufzeit ist abhängig von der Güte einer zu wählenden Schätzfunktion $h : V \rightarrow \mathbb{R}$. Somit führt eine Schätzfunktion, welche das tatsächliche Ergebnis so genau wie möglich annähert, zu einer größtmöglichen Effizienz des Algorithmus. Die Kostenfunktion $f(c, s, z)$ ergibt sich allgemein zu

$$f(c, s, z) = g(s, c) + h(c, z).$$

$g(s, c)$ beschreibt die tatsächlichen Kosten vom Startknoten s zum aktuellen Knoten c und $h(c, z)$ die geschätzten Kosten vom aktuellen Knoten c zum Zielknoten z . Stimmt die Schätzfunktion mit der Distanz überein, so werden auch nur diejenigen Knoten besucht, die sich auch tatsächlich auf dem kürzesten Weg befinden. Wählt man die Schätzfunktion $h \equiv 0$, so erhält man den Dijkstra Algorithmus.

Im praktischen Gebrauch gilt es häufig die Entfernung zwischen zwei Knoten in einem Graphen zu bestimmen. Zur Anwendung kommen hierfür meist Algorithmen welche das SSSP Problem lösen und frühstmöglich abgebrochen werden. Dies läßt sich besonders für den Algorithmus von Dijkstra damit begründen, dass es sich um einen *Greedy-Algorithmus* handelt und somit trotz frühzeitigem Abbruch immer eine optimale Lösung gefunden wird.

5.4.3 Modifikation des Dijkstra Algorithmus

Zur Steigerung der Effizienz des Dijkstra Algorithmus bieten sich unterschiedliche Ansätze an, welche auf die Verwendung von Heaps und Buckets zurückgreifen. Tabelle 5.3 zeigt

Tabelle 5.3: Komplexitäten des Dijkstra Algorithmus [Ahuja u. a. 1990]

Priority Queue	Laufzeit
Ohne	$\mathcal{O}(n^2)$
Fibonacci Heap	$\mathcal{O}(m + n \log n)$
Radix Heap	$\mathcal{O}(m + n \log C)$
m: Kanten n: Knoten C: max. Kantenlänge	

die unterschiedlichen Laufzeiten bei der Verwendung von Fibonacci Heaps [Fredman u. Tarjan 1987], Radix Heaps und ohne Prioritätswarteschlange. Die hier dargestellten maximalen Rechenzeiten beruhen auf den Untersuchungen von [Ahuja u. a. 1990]. Bei der

angegebenen maximalen Rechenzeit für Radix Heaps, handelt sich um einen Wert der beim Einsatz von einstufigen Heaps erzielt wird.

In Abbildung 5.17 sind die erwähnten Komplexitäten, für eine Knotenanzahl von $n = 100$, einer Kantenanzahl von $m = 197$ und einer maximalen Kantenlänge $C = 10$, in einem Schaubild dargestellt.

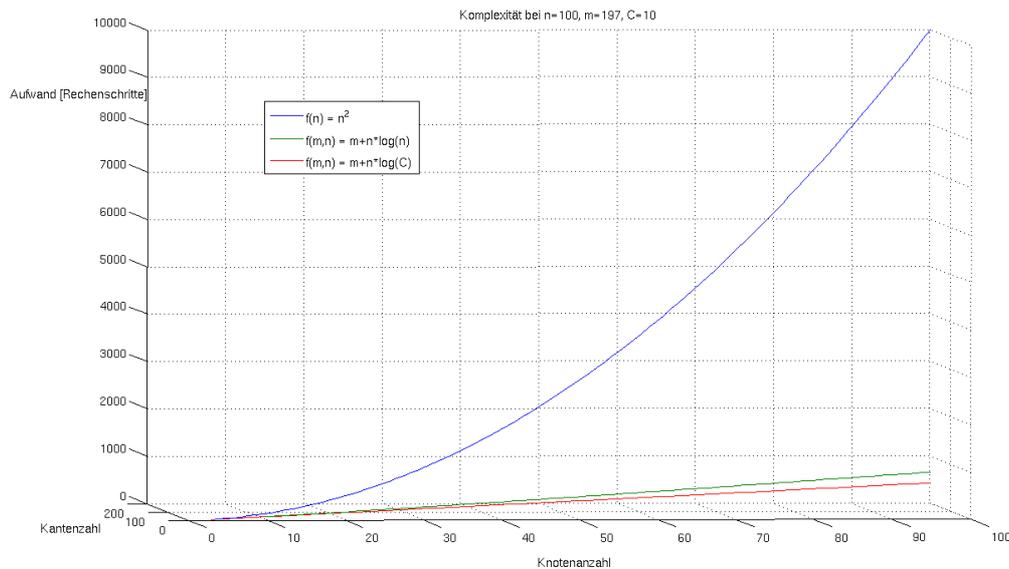


Abbildung 5.17: Komplexitäten des Dijkstra Algorithmus

Einstufige Radix Heaps bestehen aus

$$B = \log_2(C + 1) + 2$$

Buckets, wobei jedes Bucket als doppelt verkettete Liste implementiert wird. Dadurch können Knoten in konstanter Zeit eingefügt und entfernt werden. Die Größe der einzelnen Buckets berechnet sich wie folgt:

$$size(i) = \begin{cases} 1 & \text{für } i = 1 \\ 2^{i-2} & \text{für } 2 \leq i \leq B - 1 \\ nC + 1 & \text{für } i=B. \end{cases}$$

5.4.4 Implementierte Berechnung des kürzesten Weges

Als Datengrundlage zur Berechnung dient ein Dreiecksnetz im VRML Format wie in Abbildung 5.6 dargestellt. Wird dieses intern als sogenanntes *IndexedFaceSet* repräsentiert, so lassen sich daraus alle Knoten und die dazugehörigen Kanten extrahieren. Die notwendigen Kantengewichte ergeben sich aus der Länge der Kanten zwischen den entsprechenden Punkten nach

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

wobei durch Rundung, $s \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ erreicht wird. Die so gewonnenen Informationen bilden die Grundlagen für die Berechnung der kürzesten Wege. Der implementierte Dijkstra Algorithmus mit Radix Heaps berechnet den kürzesten Weg zwischen zwei beliebigen Punkten. Das Ergebnis lässt sich wiederum in einer VRML Datei, oder aber alternativ in einer X3D Datei, speichern und kann entsprechend Abbildung 5.18 dargestellt werden.

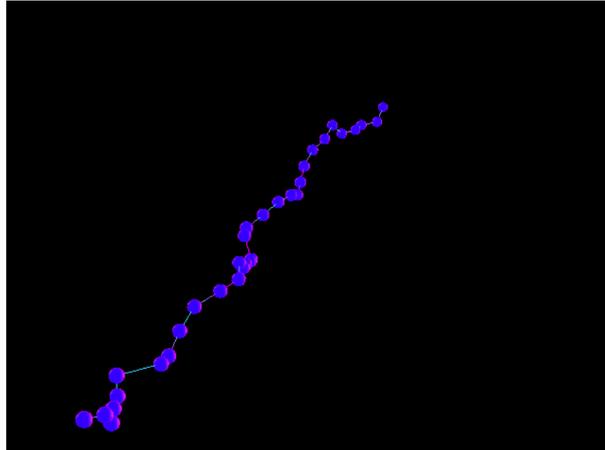


Abbildung 5.18: Berechneter Weg

Eine solche Darstellung wird dem Nutzer in Echtzeit in sein Gesichtsfeld eingespiegelt und unterstützt ihn so bei der Navigation im Gelände. Die Stützpunkte des kürzesten Weges werden durch Kugeln dargestellt und durch Geraden miteinander verbunden. Ein Anwender kann nun den Verbindungsstücken von einer Kugel zur nächsten folgen und gelangt so von seinem gewählten Startpunkt zum gewünschten Zielpunkt.

Abbildung 5.19 zeigt den berechneten Weg eingebettet in das Dreiecksnetz welches die Grundlage für die Bestimmung gebildet hat. Hiermit lässt sich als Übersicht zeigen wie der Weg tatsächlich im Gelände verlaufen soll.

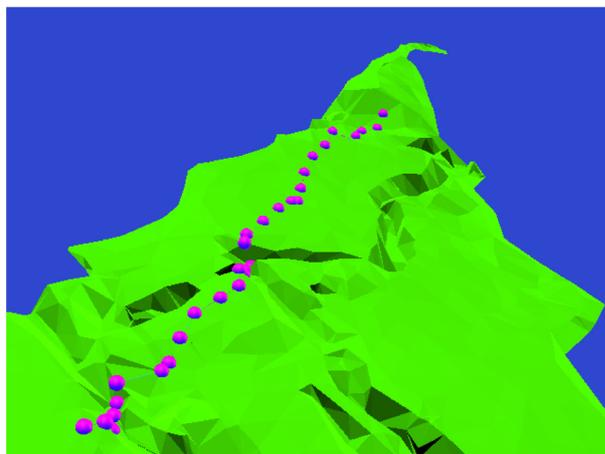


Abbildung 5.19: Weg im zugrundeliegenden Dreiecksnetz

5.5 Erweiterung des Visualisierungsfensters

Neben Objekten welche der reinen Überlagerung mit der Umwelt dienen, ist es notwendig dem Nutzer zusätzliche Informationen einzublenden, welche bei Bedarf von diesem jedoch auch wieder abgeschaltet werden können. Hierzu zählen wie bei Navigations-Applikationen auch, Statusinformationen bezüglich des Systems und der Sensoren. Außerdem ist es vorstellbar, eine Ansicht des Geländes aus einer anderen Perspektive, sowie Zusatzinformationen bezüglich Objekten die sich momentan im Gesichtsfeld des Anwenders befinden einzuspiegeln. Das Hauptziel der zuletzt genannten Komponenten ist, den Nutzer bei der Navigation zu unterstützen.

Durch unterschiedliche Einfärbung der Statuszeile am oberen Bildrand lässt sich der aktuelle Zustand eines angeschlossenen Sensors darstellen. Von Interesse kann hierbei zum Beispiel sein, ob dieser einsatzbereit ist oder nicht oder mit welcher Genauigkeit die ausgelesenen Messwerte zur Verfügung stehen. Damit bietet sich auf visuellem Weg eine einfache Möglichkeit, dem Nutzer weitere Sensorinformationen zu übermitteln.

Gleichzeitig mit den Statusinformationen werden auch die ausgelesenen/aufbereiteten Messwerte dargestellt. Dies geschieht ebenfalls am oberen Rand des Visualisierungsfensters (vergleiche Abbildung 5.20).

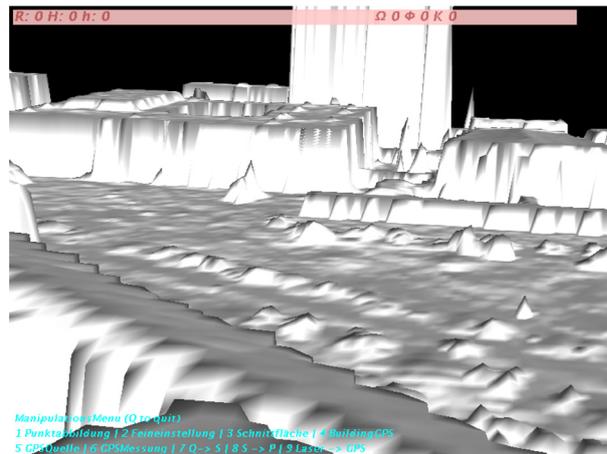


Abbildung 5.20: Zusätzlich eingespiegelte Informationen

Diese zeigt, wie sich zum Beispiel die Position in Gauß-Krüger Koordinaten (R, H) inklusive der ellipsoidischen Höhe h und die Orientierung des Systems anhand der drei Drehwinkel (Ω, Φ, K) anzeigen lassen können. Die Hintergrundfarbe des Anzeigebereichs dieser Informationen spiegelt den Status des GPS Systems wider. Da in diesem Fall (zu Demonstrationszwecken) keine Sensoren angeschlossen sind, ist die Statuszeile rot eingefärbt, und die translatorischen und rotatorischen Komponenten sind jeweils gleich 0. Die IMU informiert den Anwender mittels akustischer Signale über den aktuellen Zustand des Sensors. Dies wurde bereits vom Hersteller bewerkstelligt, um den Anwender zum Beispiel über einen bevorstehenden, kritischen Akkuladezustand zu informieren. In der dargestellten Form werden die Position und die Orientierung zwar sehr genau ausgegeben, allerdings ist dies nur dann hilfreich wenn der Anwender a-priori Wissen bezüglich der Umgebung besitzt und die Informationen in einen räumlichen Bezug setzen

kann. So könnte es zum Beispiel hilfreich sein den Standort, also die Koordinaten, eines Gebäudes zu kennen und sich so im Gelände zurechtzufinden und zu navigieren. Da dies jedoch in den meisten Fällen nicht zutreffend ist, muss dazu übergegangen werden eine anschaulichere Form zur Visualisierung solcher Informationen bereitzustellen. Als Alternative und/oder Ergänzung wird deshalb im folgenden eine Darstellung vorgeschlagen, die dem Anwender das Untersuchungsgebiet aus einer anderen Perspektive ein spiegelt und so bei der Navigation unterstützt.

5.5.1 2D Übersichtsfenster

Um dem Nutzer eine Möglichkeit zu bieten, sich anhand einer bildlichen Darstellung im Gelände zu positionieren, kann eine zweidimensionale Übersicht des Einsatzgebietes eingeblendet werden. Grundlage hierfür bildet entweder ein Satellitenbild oder eine aus den vorhandenen Daten generierte farbcodierte Höhendarstellung des gesamten Gebietes. In diesen wird die aktuelle Position des Anwenders markiert. Sicherlich ist die darstellbare Genauigkeit entsprechend schlechter, verglichen mit der Ausgabe der Absolutkoordinaten, doch kann sich ein Nutzer so einen Überblick aus der Vogelperspektive von der Umgebung verschaffen. Und in ihrer Kombination ergänzen sich beide Darstellungsformen zu einem vollwertigen Hilfsmittel zur Navigation im Gelände.

Abbildung 5.21 zeigt die beschriebene, farbcodierte Darstellung des vorhandenen Datenmaterials im Untersuchungsgebiet. Als Grundlage dient ein DOM welches aus Laserscanningdaten generiert werden kann. In dieser Darstellung werden die Daten des DOMs, welche zum aktuellen Zeitpunkt für die Tiefenberechnung verwendet werden (3×3 -Raster) markiert und der Standpunkt des Nutzers (rot eingefärbter Kreis) in Echtzeit gekennzeichnet. Ein solches Fenster kann dann bei Bedarf in das Gesichtsfeld eingeblendet werden, wodurch der Anwender seine momentane Position im Gelände, in einer Übersicht dargestellt bekommt.



Abbildung 5.21: 2D Fenster mit farbcodierter Darstellung des Geländes

5.5.2 Die Oberfläche im Überblick

Zusammenfassend werden die implementierten Elemente der Oberfläche noch einmal in Abbildung 5.22 gezeigt.

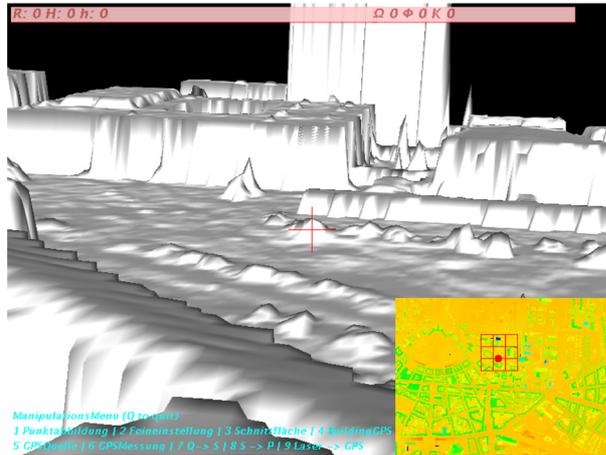


Abbildung 5.22: Implementierte Elemente der Interaktion

Als permanente Ausgabe finden sich am oberen Anzeigebereich die aktuellen Sensormesswerte von GPS und Inertialsensor. Die aktuell verfügbare Positionsgenauigkeit des GPS Empfängers wird hierbei durch das Einfärben der Statuszeile in drei unterschiedliche Farben ausgegeben. Rot bedeutet, dass keine Echtzeitposition verfügbar ist oder aber auch, dass, so wie in diesem Fall, kein Empfänger angeschlossen ist. Gelb, dass zwar eine Echtzeitposition verfügbar ist, aber die Mehrdeutigkeiten nicht fixiert sind. Und schließlich bedeutet eine grüne Färbung, dass sowohl die Position in Echtzeit, als auch die Mehrdeutigkeiten fixiert sind.

Das Übersichtsfenster wird bei gleichzeitig visualisierter Statusanzeige rechts unten, sonst rechts oben, dargestellt. Es zeigt auf Wunsch des Nutzers die aktuelle Position zusätzlich in graphischer Form an. Außerdem wird angezeigt welche Daten gerade zur Überlagerung bzw. Tiefenberechnung geladen sind.

Daneben findet sich die eigentliche Steuerungskomponente des Systems. Die aufgelisteten Tastaturkürzel und die entsprechenden Beschreibungen lassen den Nutzer mit dem System interagieren.

Als weiteres Element kann ein Fadenkreuz eingeblendet werden, welches bei entsprechender Ausrichtung, zusätzliche Informationen bezüglich der künstlichen Objekte und des Geländes abfragen kann. Es entspricht der „Direkthilfe“ bei Office Programmen oder dem Informationsbutton bei Geoinformationssystemen (GIS). Hierzu ist es notwendig, dass zum einen notwendige Metadaten zur Verfügung stehen. Zum anderen können solche Informationen nur dann angefragt werden, wenn sich hinter einem Objekt im Gelände (z. B. einem Haus in der Natur) auch ein hierzu in Bezug stehendes künstliches Modell befindet. Schneidet nun eine gedachte Linie ausgehend vom Fadenkreuz in Bildschirmrichtung das Modell, so können die gespeicherten Daten ausgegeben werden. Eine solche zusätzliche Funktion ist besonders hilfreich, will man z. B. bei der Navigation Informationen bezüglich einzelner Wegpunkte oder über sich im Gesichtsfeld befindliche Objekte erfahren.

Ein Vergleich zu den in Abschnitt 5.2.4 getroffenen Vorgaben für die Anordnung der Interaktionselemente zeigt, dass, bis auf das Übersichtsfenster, sich alle Komponenten in den dafür vorgesehenen Bereichen befinden, vergleiche Abbildung 5.23. Damit ist gewährleistet, dass für die Einspiegelung der künstlichen Objekte zur Überlagerung zum einen genügend Fläche zur Verfügung steht und zum anderen der Fokus des Anwenders nicht abgelenkt wird. Das Übersichtsfenster nimmt hierbei eine Sonderstellung ein. Es muß aufgrund seines Inhaltes, entweder eine Karte oder ein Bild, eine gewisse Mindestgröße besitzen, damit es für den Anwender weiterhin lesbar bleibt. Somit ist es notwendig entweder einen Kompromiss zwischen der Verdeckung des Anzeigenbereiches und der dargestellten Größe dieses Fensters zu treffen oder aber den in der Übersicht visualisierten Ausschnitt, bei besserer Auflösung, zu verkleinern. Der zweite Ansatz würde es erlauben ein kleineres Übersichtsfenster anzuzeigen.

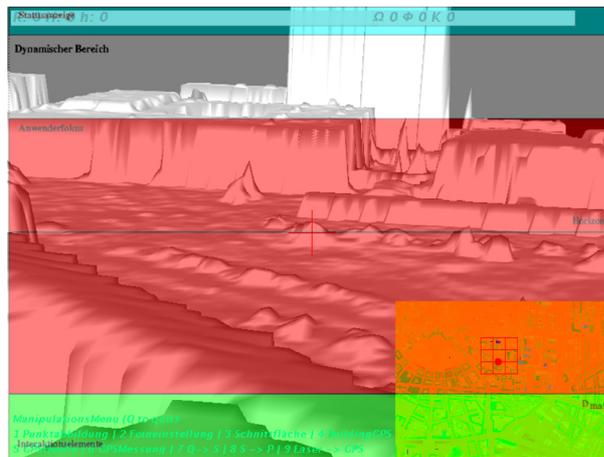


Abbildung 5.23: Anordnung der Elemente im Vergleich zur Vorgabe

Kapitel 6

Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel werden die entwickelten Komponenten zur Navigation und Interaktion im Kontext eines Augmented Reality Systems und dem tatsächlichen Einsatz im Gelände präsentiert. Das Gesamtsystem und die verschiedenen Hard- und Softwarekomponenten wurden bereits in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellt, weshalb nachfolgend auf dies verzichtet und stattdessen eine Analyse und Bewertung der praktischen Ergebnisse vorgenommen wird.

6.1 Detektion von Strukturen im Gelände

Für die Bestimmung der Position mit Hilfe der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Kameramethodik ist es notwendig Objekte im Gelände zu erkennen. Die Art und der Ursprung dieser ist hierbei sekundär. Als einzige Voraussetzung gilt, dass der Einsatz künstlicher Marken, welche vor dem Einsatz angebracht werden müssten, nicht vorgesehen ist. Vielmehr werden solche Gegenstände herangezogen, welche zum einen im Gelände ohnehin bereits vorhanden sind und zum anderen eine geradlinige Ausprägung besitzen.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Erkennen solcher Strukturen sind, wie zum Teil bereits in Abschnitt 4.4.4 angedeutet, insbesondere:

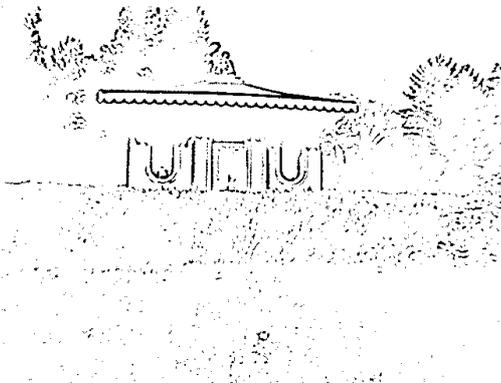
- **Beleuchtungssituation:** Zu grelles Sonnenlicht oder unzureichend ausgeleuchtete Situationen führen dazu, dass vorhandenen Grauwertunterschiede nur noch sehr schlecht wahrzunehmen sind. Dadurch reduziert sich Anzahl der detektierbaren Objekte.
- **Kontrast im Gelände:** Situationen in denen aufgrund monotoner Beschaffenheit des Geländes, z. B. durch Bewaldung geprägt, nur sehr geringe Grauwertunterschiede auftreten eignen sich nur äußerst bedingt.
- **Entfernung zum Objekt:** Aufgrund des zu erwartenden Bewegungsverhaltens eines Anwenders, auf ein Objekt zu und/oder um ein solches herum, werden weit entfernte Strukturen nicht erkannt. Diese würden zum einen während der Bewegung

zu leicht aus dem Gesichtsfeld verschwinden und könnten somit für die Positionsbestimmung nicht verwendet werden. Und zum anderen können diese, durch die mit wachsendem Abstand vom Projektionszentrum zunehmende Unschärfe in den beobachteten Bildern, kaum oder überhaupt nicht wahrgenommen werden.

- **Beschaffenheit des Objekts:** Gebäude mit vielen Anbauten oder einer bewegten Oberfläche können dazu führen, dass die Ergebnismenge unüberschaubar wird und sich somit der Rechenaufwand zur Bestimmung der Koordinaten immens vergrößert.
- **Anzahl der vorhandenen Objekte:** Sind zu viele Einzelobjekt in einer Szene detektierbar, so schränkt dies die Bewegungsfreiheit des Anwenders aufgrund der notwendigen Weiterverfolgung der Objekte stark ein.

Beispiele für die Möglichkeiten die sich durch die entwickelte Methodik bieten, wird anhand der folgenden Darstellungen demonstriert. Dabei zeigt die linke Abbildung immer das Ergebnis der Filterung. Die rechte stellt den Anfangs- und den Endpunkt, durch rote Punkte markiert, einer im Eingabebild detektierten Struktur dar. Im Rahmen dieser Arbeit handelt es sich dabei um Geraden. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit der Abbildungen, sind die detektierten Kanten durch eine rote Gerade angedeutet. Diese sind jedoch lediglich als Auswahl von je einer besonders deutlich erkennbaren Kante im Bildausschnitt zu verstehen.

In Abbildung 6.1 wird die Dachkante eines Gebäudes erkannt. Durch den signifikanten Grauwertunterschied zwischen Dach und Blende wird die gesuchte Gerade definiert.



(a) *Gefiltertes Binärbild*



(b) *Detektierter Anfangs- und Endpunkt*

Abbildung 6.1: Detektion einer Dachkante

Ein ähnliches Ergebnis zeigt Abbildung 6.2. Hier wird aufgrund der unterschiedlichen Beleuchtung und Ausrichtung von Fassade und Decke des Vorbaus eine Kante an deren Übergang erkannt. Abbildung 6.2(a) lässt aber auch noch weitere geradlinige und deutlich ausgeprägte Strukturen erkennen. Doch insbesondere bei Gebäuden gilt es ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Anzahl von zu detektierenden Kanten und der Bewegungsfreiheit des Anwenders zu finden. Die Anzahl der Kanten welche erkannt werden sollen, lässt sich, zur Laufzeit, durch Festlegung einer minimal auftretenden Kantenlänge einschränken. Dies geschieht interaktiv durch den Anwender.

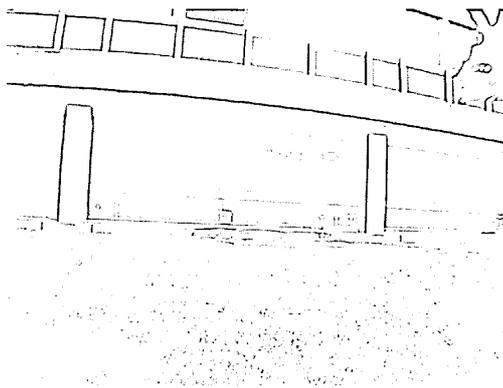
(a) *Gefiltertes Binärbild*(b) *Detektierter Anfangs- und Endpunkt*

Abbildung 6.2: Detektierte Gebäudestruktur

Wie in Abschnitt 4.4.1 bereits beschrieben, ist es notwendig die detektierten Strukturen zwischen den Aufnahmen weiterzuverfolgen. Dies bedeutet, dass sich diese permanent im Gesichtsfeld der Kamera befinden müssen. Mit zunehmender Anzahl detektierter Strukturen steigt allerdings auch deren räumliche Verteilung im Bildausschnitt und somit die Gefahr, diese zwischen zwei Standpunkten aus dem Blickfeld der Kamera zu verlieren. Für den Benutzer eines solchen Systems stellt sich somit die Aufgabe, sich angemessen zu bewegen, ohne dabei eine kontinuierliche Verfolgung der detektierten Objekte zu gefährden. Eine solche Vorgabe schränkt allerdings die Bewegungsfreiheit des Anwenders ein. Aus diesem Grund stellen zum Beispiel Fenster, welche zwar zumeist gute Voraussetzungen für eine zuverlässige Detektion von Kanten bieten, eine Besonderheit dar. Durch ihre oft geringen Ausmaße sowohl in Breite als Höhe, würden zu viele weitere Strukturen mit der selben Kantenlänge, welche sich ebenfalls im Eingabebild befinden, erkannt werden. Diese lägen dann über den gesamten Bildausschnitt verteilt, was eine kontinuierliche Verfolgung aller Punkte zwischen den Aufnahmeorten nur durch erheblichen Mehraufwand gewährleisten würde. Demzufolge sollten eher vergleichsweise lange Kanten, wie sie zum Beispiel an Gebäudeecken oder an Übergängen vorkommen, erfasst werden.

Abbildung 6.3 stellt ein Beispiel für den vertikalen Verlauf einer Kante dar. Auch hier beruht die Detektion auf der unterschiedlichen Beleuchtungssituation und Ausrichtung, in diesem Fall jedoch der beiden Hauswände.

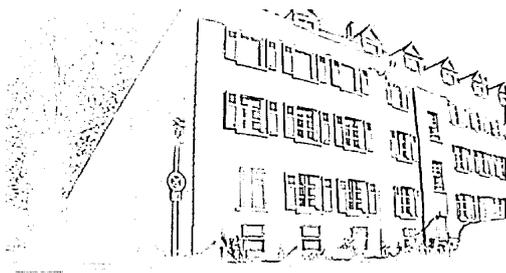
(a) *Gefiltertes Binärbild*(b) *Detektierter Anfangs- und Endpunkt*

Abbildung 6.3: Detektierte Hauskante

Neben geradlinigen häuserspezifischen Strukturen können weitere erkannt werden. So bietet sich zum Beispiel der Mast einer Straßenlaterne an. Wie Abbildung 6.4 zeigt, lässt sich dieser gut erfassen.

(a) *Gefiltertes Binärbild*(b) *Detektierter Anfangs- und Endpunkt*

Abbildung 6.4: Detektierte Straßenlaterne

Ein Beispiel für die Detektion natürlicher Objekte ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Bäume die vom Stammfußpunkt bis zur Unterkante der Krone keine Äste tragen und einen geradlinigen Wuchs aufweisen, können zur Detektion herangezogen werden.

6.1.1 Analyse der Detektion

Zur Untersuchung der Genauigkeit der implementierten Kameramethodik werden von zwei Standpunkten aus, Punkte deren Koordinaten in einem übergeordneten System bekannt sind detektiert. In Abbildung 6.6 sind diese gekennzeichnet und durchnummeriert. Dabei bilden die Punktpaare (1, 2), (3, 4) und (5, 6) jeweils die erkannten geradlinigen Strukturen. Der Punkt mit der Nummer 5 ist dabei nahezu identisch mit Punkt Nummer 1.

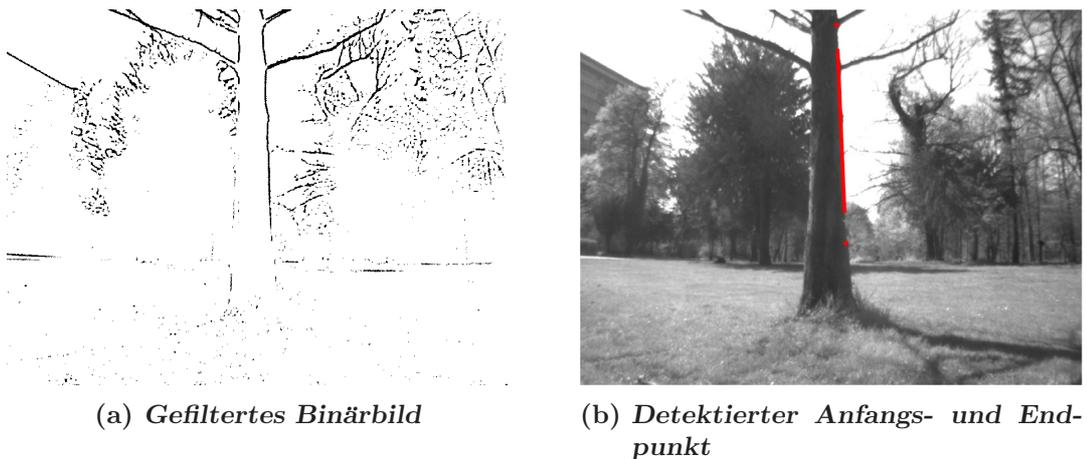


Abbildung 6.5: Detektierter Baumstamm

Dieser wird zwar bis zur endgültigen Aufnahme vom zweiten Standpunkt aus mitverfolgt, jedoch bei der folgenden Auswertung nicht berücksichtigt, da er das Ergebnis zu sehr verfälscht. Der Punkt mit der Nummer 4 hingegen kann vom zweiten Aufnahmestandpunkt aus nicht mehr erkannt werden, da er von dem Pfeiler im Vordergrund verdeckt wird. Deshalb findet er in der Auswertung ebenfalls keine Berücksichtigung. Damit stehen schließlich vier Punkte zur Verfügung die zum einen in die Berechnung mit einfließen und deren Koordinaten zum anderen bestimmt werden können.

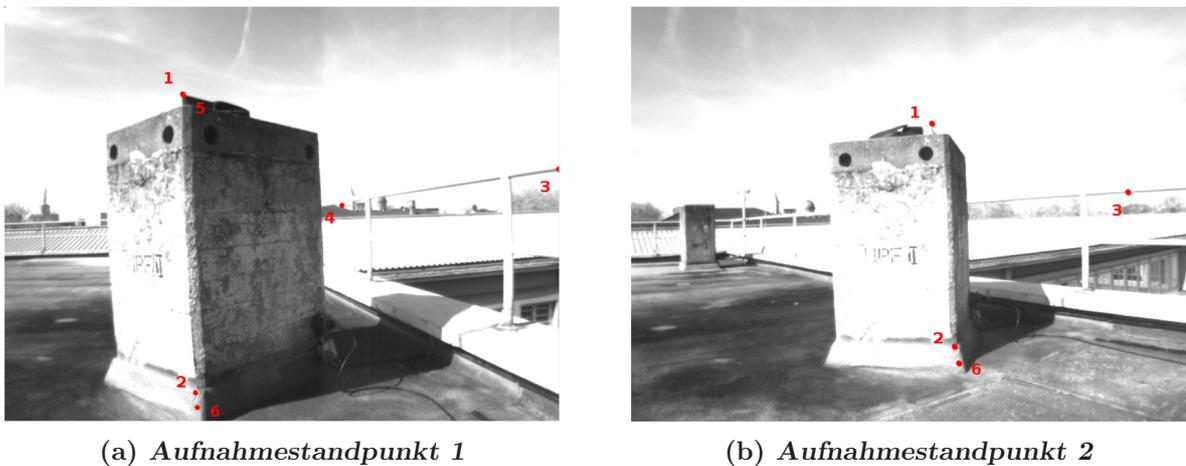


Abbildung 6.6: Detektion von Strukturen im Gelände

In Tabelle 6.1(a) sind zunächst die mittels GPS bestimmten und die aus der Kameramethodik berechneten Gauß-Krüger Koordinaten dargestellt. Die erzielten Genauigkeiten zeigt Tabelle 6.1(b). Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Koordinaten lassen sich auf das Rauschen in den Orientierungsmessungen des Inertialsensors zurückführen. Sämtliche Parameter, welche für die Berechnung der Objektkoordinaten notwendig sind und nicht vom Inertialsensor bestimmt werden, sind mit höchster Genauigkeit bekannt. Dies gilt sowohl für den translatorischen Anteil der äußeren Orientierung, bestimmt mittels GPS, als auch für die innere Orientierung der Kamera, bekannt aus einer Kalibrierung. Da-

Tabelle 6.1: Genauigkeitsbetrachtung detektierter Objektkoordinaten

(a) *Objektkoordinaten*

Punktnummer	Gemessene Koordinaten [m]			Berechnete Koordinaten [m]		
	R	H	h	R	H	h
1	³⁴ 56986.016	⁵⁴ 30593.342	181.437	³⁴ 56986.115	⁵⁴ 30593.395	181.514
2	³⁴ 56986.107	⁵⁴ 30593.507	180.430	³⁴ 56986.136	⁵⁴ 30593.691	180.554
3	³⁴ 56985.045	⁵⁴ 30594.213	181.213	³⁴ 56985.056	⁵⁴ 30594.249	181.319
6	³⁴ 56986.159	⁵⁴ 30593.540	180.370	³⁴ 56986.335	⁵⁴ 30593.735	180.356

(b) *Genauigkeiten*

Punktnummer	Differenz [m]		
	Δ_R	Δ_H	Δ_h
1	-0.099	-0.053	-0.077
2	-0.029	-0.184	-0.124
3	-0.011	-0.036	-0.106
6	-0.176	-0.195	-0.014

mit ist die IMU die genauigkeitsbeeinflussende Komponente in diesem Zusammenhang. Trotz allem zeigt sich, dass die Koordinaten der detektierten Punkte mit ausreichender Genauigkeit bestimmbar sind.

6.1.2 Berechnung der Position aus Objektkoordinaten

Die Bestimmung der Position der Trägerplattform aus detektierten Punkten erfolgt mittels eines überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitts. Das bedeutet, dass mindestens vier Passpunkte vorhanden sein müssen. Diese lassen sich, wie bereits beschrieben, anhand von geradlinigen Strukturen ermitteln. Auch hier gilt, dass die erkannten Punkte ausreichend räumlich verteilt sein müssen. Durch die Verwendung des Ausgleichsprinzips zur Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen ($v^t P v \rightarrow \min.$; Methode der kleinsten Quadrate), lässt sich die äußere Orientierung bestimmen. Dabei sind in diesem Zusammenhang insbesondere die drei Komponenten der Translation von Interesse, weil die Rotation auch während eines GPS Signalverlusts weiterhin mit der IMU gemessen wird. Die benötigten Näherungswerte ω , ϕ und κ sind somit also recht gut bestimmbar. Die Näherungswerte für die Translation (X_0 , Y_0 und Z_0) stammen aus dem letzten bekannten, beobachteten Standpunkt.

Tabelle 6.2(a) zeigt nun zum einen die Koordinaten eines mittels GPS bestimmten Punktes und zum anderen die Koordinaten des gleichen Standpunktes, wie sie sich durch Anwendung der in Abschnitt 4.4.1 vorgestellte Kameramethodik ergeben. Für die Bestimmung der Position durch Berechnung eines räumlichen Rückwärtsschnittes wurden die vier detektierten und berechneten Objektpunkte aus Tabelle 6.1(a) verwendet. Die in den Tabellen 6.2(b) und 6.2(c) angegebenen Genauigkeiten zeigen zum einen, dass die Stan-

Tabelle 6.2: Genauigkeitsbetrachtung zur Bestimmung der eigenen Position

(a) *Standpunktkoordinaten*

Gemessene Koordinaten [m]			Berechnete Koordinaten [m]		
R	H	h	R	H	h
³⁴ 56986.704	⁵⁴ 30594.113	180.675	³⁴ 56986.313	⁵⁴ 30593.734	180.361

(b) *Standpunktgenauigkeiten*

Differenz [m]		
Δ_R	Δ_H	Δ_h
-0.391	0.379	0.314

(c) *Standardabweichungen der Orientierungselemente*

Standardabweichungen [m], [°]					
σ_R	σ_H	σ_h	σ_ω	σ_ϕ	σ_κ
0.0045	0.0008	0.0008	0.0303	0.0603	0.0451

Standardabweichung der Parameter sich im zu erwartenden Bereich befindet. Zum anderen sind die absoluten Koordinatendifferenzen noch akzeptabel, wenn man bedenkt dass die Auswertung sich auf die minimalen Anforderungen stützt. Für die Navigation sind die Ergebnisse somit durchaus befriedigend.

Zur Steigerung der Genauigkeit bietet es sich jedoch an mehr als die für die Berechnung eines überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitts geforderte Anzahl von vier Punkte zu verwenden. Bei entsprechender räumlicher Verteilung der Passpunkte über den gesamten Bildausschnitt ist es dann bereits ausreichend, einige wenige weitere Punkte mit in die Berechnung einzubeziehen.

6.2 Einsatz der Komponenten des Leitsystems

Einziger permanent sichtbarer Bestandteil des Leitsystems sind die Tastaturkürzel welche dem Nutzer zur Interaktion mit dem System zur Verfügung stehen. Abbildung 6.7 zeigt, dass durch die Verwendung der Tastatursteuerung, in Abschnitt 5.3.2 detailliert beschrieben, der Anzeigebereich kaum in Anspruch genommen wird. Lediglich ein kleiner Teil am unteren Rand des Gesichtsfeld ($\sim 6\%$) wird verwendet und steht somit für die Einspiegelung künstlicher Objekte nur eingeschränkt zur Verfügung. Der überwiegende Bereich ($\sim 94\%$) kann somit für die eigentliche Überlagerung eingesetzt werden.



Abbildung 6.7: Tastatursteuerung

Die Statusanzeige, welche die Qualität der mittels GPS bestimmten Position und die aktuellen Koordinaten der Position und die Orientierung der Plattform darstellt, kann bei Bedarf am oberen Rand der Anzeige visualisiert werden. Diesen Sachverhalt zeigt Abbildung 6.8.



Abbildung 6.8: Statusanzeige

Auch hier gilt, dass lediglich ein kleiner Teil des gesamten Anzeigenbereichs ($\sim 2\%$) in Anspruch genommen wird. Durch die Verwendung dieser Elemente reduziert sich die Fläche für das Anzeigen der künstlichen Objekte minimal, und es stehen weiterhin ausreichende $\sim 92\%$ der Gesamtfläche zur Verfügung.

Das ähnlich wie die Statusanzeige temporär visualisierbare Übersichtsfenster, welches das Untersuchungsgebiet aus der Vogelperspektive darstellt, ist in Abbildung 6.9 in der rechten oberen Ecke der Anzeige platziert.

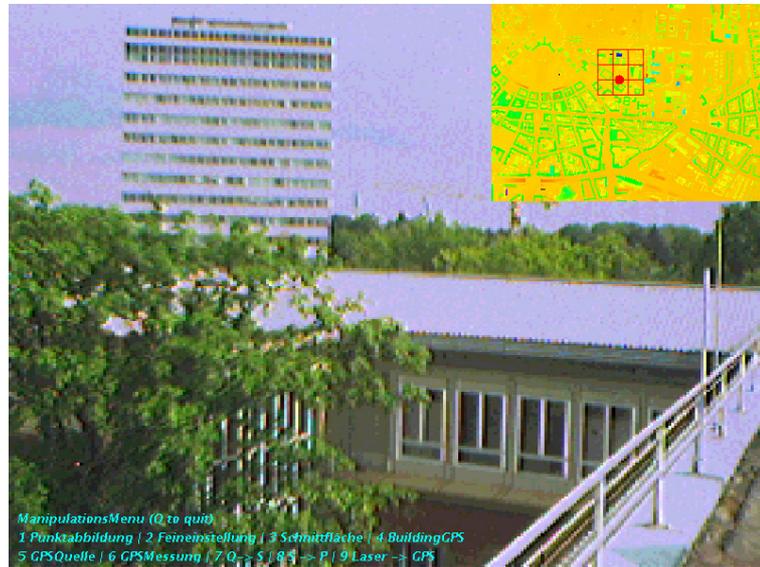


Abbildung 6.9: Übersichtsfenster

Aufgrund seiner, für die Lesbarkeit notwendigen Größe, befindet es sich zu einem gewissen Teil innerhalb des Bereichs, welcher für die Statusanzeige vorgesehen ist. Der überwiegende Ausschnitt wird im dynamischen Bereich abgebildet. Da es im Vergleich zu den übrigen Komponenten recht viel Platz ($\sim 12\%$) des Ausgabemediums in Anspruch nimmt, sollte es nicht permanent dargestellt werden.

Ein Beispiel für die Verwendung des Fadenkreuzes zeigt Abbildung 6.10. Hier werden die vorhandenen Gebäudemodelle zwar geladen und entsprechend der Position und Orientierung der Plattform ausgerichtet, jedoch nicht in das Gesichtsfeld des Anwenders eingespiegelt. Sie werden mit den Objekten im Gelände zur Deckung gebracht. Da sie jedoch nur eine stark generalisierte Form darstellen und den visuellen Eindruck der Szene nicht steigern, werden sie lediglich im Hintergrund gehalten. Dieses Prinzip welches sich dahinter verbirgt zeigt Abbildung 6.10(b). Wird nun das Fadenkreuz gestartet, so wird mittels permanentem Picking⁴ die virtuelle Szene abgefragt. Durch ein solches Vorgehen werden jene Objekte der virtuellen Szene selektiert, welche sich gerade im Fokus des Fadenkreuzes befinden. Über diese werden anschließend Informationen ermittelt die gemeinsam mit der Beschreibung der Geometrie abgespeichert sind. Diese Informationen werden dann, wenn möglich, im Bereich der Statusanzeige oder alternativ in der Nähe des Fadenkreuzes ausgegeben.

⁴Beim Picking werden Objekte einer virtuellen Szene selektiert. Über diese können dann anschließend Informationen ermittelt werden.

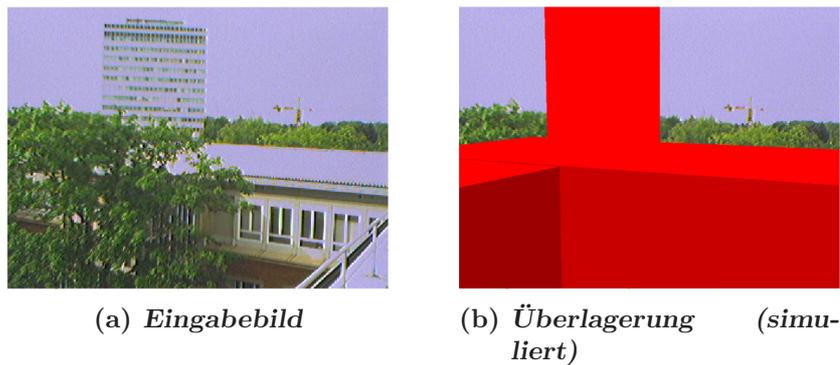


Abbildung 6.10: Anwendung des Fadenkreuzes

In Tabelle 6.3 sind die einzelnen Komponenten mit dem durch sie verdeckten Bereich, angegeben in Prozent der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche zur Visualisierung, zusammenfassend aufgelistet. Das Fadenkreuz wird hierbei nicht berücksichtigt, da sein Anteil bei der Verdeckung verschwindend gering ausfällt. Es zeigt sich aber, dass bereits durch wenige zusätzliche Elemente der verfügbare Anzeigenbereich deutlich reduziert. Gerade bei AR ist es aber entscheidend, dass ausreichend Platz zur Überlagerung nutzbar ist. Deshalb stehen nicht permanent benötigte Anzeigen zwar dauerhaft zur Verfügung, können aber nach Bedarf aufgerufen und eingeblendet werden.

Ein Beispiel für die Überlagerung eines berechneten Weges mit der Umgebung zeigt Abbildung 6.11. Angesichts der Tatsache, dass für die Berechnung Daten eines DOMs verwendet werden, finden temporär vorhandene Objekte, wie in diesem Fall, Autos, keine Berücksichtigung. Für den Anwender bedeutet dies, dass er selbstständig den Weg um ein solches, nicht permanent vorhandenes, Hindernis finden muss. Bei größeren Objekten oder bei solchen, welche zukünftig permanent im Gelände vorhanden sein werden, jedoch noch

Tabelle 6.3: Platzbedarf der Komponenten

Tastatur (~ 6%)	Statusanzeige (~ 2%)	Übersichtsfenster (~ 12%)	Σ
X	–	–	~ 6%
X	X	–	~ 8%
X	–	X	~ 18%
X	X	X	~ 20%
<i>X: Visualisiert –: Nicht visualisiert</i>			

nicht im Datensatz enthalten sind, kann dies durchaus zu größeren Problemen führen. Hier sollte dann ein neuer Weg berechnet werden, sobald das Hindernis umgangen worden ist. Dadurch wird sichergestellt, dass auch tatsächlich der kürzeste Weg in das Gesichtsfeld eingespiegelt wird.



Abbildung 6.11: Mittels AR eingespiegelter kürzester Weg

6.3 Weitere Einsatzgebiete

Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden lassen sich nicht nur im Bereich von Augmented Reality einsetzen. Sie können auch in anderen Disziplinen mit Navigationsaufgaben zur Anwendung kommen.

Vorstellbar ist hierbei zum Beispiel die Anbindung der entwickelten Kameramethodik bei der Unterstützung der Navigation von autonomen Systemen im Gelände. Diese bieten, aufgrund ihrer im Vergleich zum Fußgänger größeren Laufruhe, eine stabilere Plattform für die Videokamera. Dadurch wird das Verfolgen von Objekten erleichtert und die Gefahr detektierte Punkte zu verlieren reduziert. Ähnliches gilt für die Verwendung der IMU.

Auch diese erreicht bei geringerer Eigenbewegung der Plattform eine größere Genauigkeit. Dies wäre bei solchen Systemen gegeben.

Die Untersuchungen zur Darstellung der Interaktionselemente kann ebenfalls auf andere Gebiete übertragen werden. Durch die häufige Verwendung von Anzeigengeräten mit beschränktem Anzeigebereich, kommt einer klaren und übersichtlichen Anordnung aller wichtigen Komponenten entscheidende Bedeutung zu. Der hier vorgestellte Ansatz berücksichtigt diese Kriterien zur Gestaltung einer Schnittstelle zur Mensch-Maschine-Interaktion und stützt sich auf einfache beschreibende Komponenten in Wort und Bild.

Kapitel 7

Ausblick

Freie Entfaltung der Persönlichkeit setzt unter den modernen Bedingungen der Datenverarbeitung den Schutz des Einzelnen gegen unbegrenzte Erhebung, Speicherung, Verwendung und Weitergabe seiner persönlichen Daten voraus.

([BVerfGE 65,1 1983])

7.1 Weiterführende Schritte

Mögliche Weiterentwicklungen des Systems lassen sich bei der vorgestellten Navigations- und auch bei der Interaktionslösung definieren. Beide Bereiche können noch durch gezielte Verbesserungen in Bezug auf ihre Robustheit und ihre Bedienbarkeit gesteigert werden.

Betrachtet man die bislang verwendeten Sensoren zur Navigation, so fällt auf, dass insbesondere GPS und IMU bereits bis an ihre sensorspezifischen Grenzen eingesetzt werden. Hier würden veränderte Algorithmen keine signifikanten Verbesserungen bewirken. Vielmehr gilt es die Stärken neu entwickelter Techniken wie z. B. GALILEO auszuloten und auszunutzen. Auch die Verwendung von IMU Sensoren mit höherer Genauigkeit bietet sich an, allerdings darf hierbei das Verhältnis von Kosten und Nutzen nicht außer Acht gelassen werden.

Was hingegen die Kamera als Sensor zur Positionsbestimmung betrifft, so lassen sich noch weitere Untersuchungen anstellen. Diese sind primär in der Verwendung unterschiedlicher Verarbeitungsmethoden für die Eingabebilder zu sehen. Gerade durch den Einsatz der bislang eingebundenen Grafikbibliothek stehen noch softwareseitige Verfahren zur Verfügung, welche die Detektion von Objekten optimieren könnten.

Ein ganz zentraler, noch weiter zu untersuchender Punkt der Kameramethodik ist die Verfolgung von erfassten Merkmalen. Damit die Bewegungsfreiheit des Anwenders erweitert wird, bieten sich hierfür zwei Möglichkeiten an. Zum einen ist die Montage der Kamera auf einer an die IMU gekoppelten Plattform vorstellbar. Mit Hilfe der ausgelesenen Orientierungsmesswerte könnte eine solche Plattform dann stets in Richtung der detektierten Objekte ausgerichtet werden. So würde trotz Bewegung gewährleistet bleiben, dass die detektierten Strukturen im Blickfeld der Kamera verweilen. Ein anderer Ansatz wäre,

durch die Verwendung von Matching-Verfahren Bildkorrespondenzen zu erkennen und so auf den momentanen Standort zu schließen.

Der Einsatz zusätzlicher Sensoren zur Ergänzung der Navigationslösung bringt nicht zwingend auch eine Verbesserung der Genauigkeits- oder Zuverlässigkeitssituation mit sich. Vielmehr soll in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass bei der Auswahl von Sensoren zur Navigation auch die in Abschnitt 7.2 angesprochene Problematik berücksichtigt werden muss.

Der Bereich der Interaktion besitzt ebenfalls noch Potential für Verbesserungen. Darunter fällt insbesondere die Verwendung von Techniken zur Sprachausgabe und -eingabe als zusätzliches Hilfsmittel zur Unterstützung des Anwenders. So können z. B. vom System Wegbeschreibungen wiedergegeben oder von diesem auf Gefahrenstellen hingewiesen werden. Dies würde die bereits implementierte visuelle Ausgabe zusätzlich unterstützen und auftretende Verständnisprobleme beseitigen. Vorstellbar ist weiterhin, dass ein Nutzer einen Teil der zur Manipulation des Systems vorhandenen Optionen, durch einfache Sprachbefehle steuert. Auch das Ablegen und Abhören von Sprachnotizen wäre auf diesem Wege denkbar.

In Abhängigkeit von der gewählten Anwendung und den damit verbundenen Anforderungen lassen sich die beiden Themenbereiche Navigation und Interaktion stetig weiterentwickeln und anpassen. Die angeführten möglichen Entwicklungen stellen hierbei lediglich erste Visionen vor.

7.2 Gefahrenpotential zukünftiger Entwicklungen

Der Begriff Informationsgesellschaft ist heutzutage gemeinhin ausschließlich positiv belegt. In den unzähligen technischen Neuerungen der Informationstechnologie werden notwendige Entwicklungen gesehen, welche den Alltag leichter bewältigen lassen. Technik spielt im Alltag eine ganz entscheidende Rolle und wird wie selbstverständlich und mit großem Vertrauen von der Gesellschaft eingesetzt.

Trotz aller technischer Weiterentwicklungen sollten die damit verbundenen Risiken nicht unerwähnt bleiben. Bereits jetzt wird eine Vielzahl persönlicher Informationen gespeichert und ausgewertet. Videoüberwachung auf öffentlichen Plätzen oder in öffentlichen Einrichtungen, Einführung des Mautsystems, Funkortung des Handys, automatische Kennzeichenerfassung oder die geplante Aufzeichnung von Fahrtdaten sind lediglich einige wenige Beispiele für die zunehmende Überwachungsmöglichkeiten des Staates und seinen ausführenden Organen in Bezug auf das Verhalten des Menschen in der Öffentlichkeit.

Es gibt weitere, von der Europäischen Union bereits verabschiedete Richtlinien, welche es jedem Mitgliedsstaat erlauben sollen, noch tiefere Einblicke in das Privatleben seiner Einwohner zu bekommen. Als ein Beispiel hierfür sei die geplante Vorratsdatenspeicherung erwähnt. Durch den Entschluss der EU zur Speicherung von Verbindungs- und Standortdaten und der baldigen Umsetzung dieser Richtlinie durch die Mitgliedsstaaten, können Profile vom Kommunikations- und vor allem Bewegungsverhalten erstellt werden und über einen gewissen Zeitraum gespeichert werden. Solche Daten fallen bei Diensten wie

Telefonie, SMS oder E-Mail regelmäßig an und können insbesondere zur Verfolgung und Überwachung von verdächtigen Personen benutzt werden.

Doch nicht nur der Staat, sondern auch die Privatwirtschaft macht sich solche Techniken zu Nutze. Diese versteckt sie in „kundenfreundlichen“ Bonussystemen. Das Bezahlen mit oder verwenden von Kundenkarten oder die Bestellung via Internet, mit der Voraussetzung ein Benutzerkonto einrichten zu müssen, gehört bereits zum Alltag und dokumentiert sowohl das Konsum- als auch das Bewegungsverhalten jedes einzelnen.

Wie solche sensiblen Daten tatsächlich verwendet werden und ob sie, wie geplant, nur von solchen erhoben werden, die entweder zugestimmt haben oder eine Gefahr für die Allgemeinheit darstellen, bleibt nur zu erahnen. Es steht jedoch außer Frage, dass jeder für sich entscheiden muss – wo dies möglich ist – in wie weit er es anderen erlaubt, sein Privatleben zu durchleuchten.

Literaturverzeichnis

3GPP 2005

3GPP home page. <http://www.3gpp.org>, August 2005. – Besucht: August 2005

Abramson u. Schowengerdt 1993

ABRAMSON, Susan B. ; SCHOWENGERDT, Robert A.: Evaluation of edge-preserving smoothing filters for digital image mapping. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 48 (1993), Nr. 23, S. 2–17

Abwerzger 2002

ABWERZGER, Guenther: *Sensor fusion of GPS and Loran-C – A raw-data based technique.* Mai 2002. – Presented on: GNSS 2002 - The European Navigation Conference

ACFR 2005

ACFR-Research-Navigation. http://www.acfr.usyd.edu.au/projects/research/navigation/Inertial%20Navigation/Intro/index_intro.html, Februar 2005. – Besucht: August 2005

Ahuja u. a. 1990

AHUJA, Ravindra K. ; MEHLHORN, Kurt ; ORLIN, James ; TARJAN, Robert E.: Faster algorithms for the shortest path problem. In: *Journal of the ACM (JACM)* 37 (1990), April, Nr. 2, S. 213–223

Albertz u. Kreiling 1989

ALBERTZ, Jörg ; KREILING, Walter: *Taschenbuch der Photogrammetrie.* Wichmann Verlag, 1989

ARTOOLKIT 2004

ARToolKit Home Page. <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, 2004. – Besucht: September 2005

AVM SIGCHI 2004

ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction. <http://www.acm.org/sigchi/cdg/>, 2004. – Besucht: August 2005

Azuma 1997

AZUMA, Ronald T.: A Survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6 (1997), August, Nr. 4, S. 355–385

Bähr 2005

BÄHR, Hans-Peter: Sprache, ein Datentyp der Bildanalyse. In: BÄHR, Hans-Peter (Hrsg.) ; (HRSG.), Thomas V. (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung*. 4. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005, S. 211–228

Bähr u. Lenk 2002

BÄHR, Hans-Peter ; LENK, Hans: Steps to Cognition and Image Analysis and in Philosophy - A Comparison. In: *PCV02 Photogrammetric Computer Vision - ISPRS Commission III*, 2002

Bähr u. Schwender 1996

BÄHR, Hans-Peter ; SCHWENDER, Anita: Linguistic Confusion in Semantic Modelling. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXI* (1996)

Baus u. a. 2002

BAUS, Jörg ; KRÜGER, Antonio ; WAHLSTER, Wolfgang: A Resource-Adaptive Mobile Navigation System. In: *Proceedings of IUI2002: International Conference on Intelligent User Interfaces 2002*, ACM Press, 2002

Beleznai u. a. 2002

BELEZNAI, Csaba ; SCHLÖGL, Thomas ; WACHMANN, Bernd ; BISCHOF, Horst ; KROPATSCH, Walter: Tracking Multiple Objects in Complex Scenes. In: LEBERL, Franz (Hrsg.) ; FRAUNDORFER, Friedrich (Hrsg.): *Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition*, 2002, S. 175–182

Bolliger 2004

BOLLIGER, Sabine: ViaRomana - Mythos und Realität der Römerstrassen. In: *Wege und Geschichte* 2 (2004), S. 17–21

Bouguet 2000

BOUGUET, Jean-Yves: Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker: Description of the algorithm / Microprocessor Research Labs, Intel Corp. 2000. – Forschungsbericht

Breunig u. a. 2005

BREUNIG, Martin ; BÄR, Wolfgang ; HÄUSSLER, Jochen ; REINHARDT, Wolfgang ; STAUB, Guido ; WIESEL, Joachim: Advancement of mobile spatial services for the geosciences. In: *Data Science Journal* (2005)

Bronstein u. a. 1999

BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, Konstantin A. ; MUSIOL, Gerhard ; MÜHLIG, Heiner: *Taschenbuch der Mathematik*. 4. Verlag Harri Deutsch, 1999

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2004

BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK (Hrsg.): *Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen: Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit*. SecuMedia, 2004

Burger u. Burge 2005

BURGER, Wilhelm ; BURGE, Mark J.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005

Burt u. Adelson 1983

BURT, Peter J. ; ADELSON, Edward H.: The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. In: *IEEE Transactions on Communications* Bd. 31, 1983, S. 532–540

BVerfGE 65,1 1983

BVerfGE 65,1 - Volkszählung. Dezember 1983. – Auszug aus dem Urteil des Ersten Senats vom 15. Dezember 1983 auf die mündliche Verhandlung vom 18. und 19. Oktober 1983 - 1 BvR 209, 269, 362, 420, 440, 484/83 in den Verfahren über die Verfassungsbeschwerden

Canny 1983

CANNY, John F.: Finding edges and lines in images / Massachusetts Institute of Technology. 1983 (720). – Forschungsbericht

Codex Palatinus Graecus 910

Codex Palatinus Graecus 398. Sammelhandschrift, 9./10. Jhd.. – Griechenland (Byzanz)

Coelho 2004

COELHO, Alexandre H.: *Erweiterte Realität zur Visualisierung simulierter Hochwasserereignisse*, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Dissertation, Dezember 2004

CX3D 2005

CyberX3D for Java. <http://www.cybergarage.org/vrml/cx3d/cx3djava/index.html>, 2005. – Besucht: Oktober 2004

Dalaff u. a. 2003

DALAFF, Carsten ; REULKE, Ralf ; KROEN, Axel ; KAHL, Thomas ; RUHE, Martin ; SCHISCHMANOW, Adrian ; SCHLOTZHAUER, Gerald ; TUCHSCHEERER, Wolfram: A Traffic Object Detection System for Road Traffic Measurement and Management. In: BAILEY, D. (Hrsg.): *IVCNZ 2003*, 2003, S. 78–83

Dijkstra 1959

DIJKSTRA, Edsger W.: A note on two problems in connection with graphs. In: *Numerische Mathematik* (1959), Nr. 1, S. 269–271

DIN 1996

Norm DIN 18716-2 Juli 1996. *Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 2: Besondere Begriffe der photogrammetrischen Auswertung*

DIN 1997

Norm DIN 18716-3 Juli 1997. *Photogrammetrie und Fernerkundung - Teil 3: Begriffe der Fernerkundung*

DIN 2002

Norm DIN EN ISO 14915-1 November 2002. *Software-Ergonomie für Multimedia-Benutzungsschnittstellen – Teil 1: Gestaltungsgrundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14915-1:2002)*

DiVerdi u. a. 2003

DIVERDI, Stephen ; NURMI, Daniel ; HÖLLERER, Tobias: ARWin - A desktop Augmented Reality Window Manager. In: *IEEE Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2003, S. 298–299

Djuknic u. Richton 2001

DJUKNIC, Goran M. ; RICHTON, Robert E.: Geolocation and assisted GPS. In: *Computer* 34 (2001), S. 123–125. – ©2001 IEEE

Duda u. Hart 1972

DUDA, Richard O. ; HART, Peter E.: Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. In: *Communications of the ACM* Bd. 15, 1972, S. 11–15

DUDEN 2005

Duden - Das Fremdwörterbuch. 8. Dudenverlag Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 2005

EGNOS 2005

ESA-Navigation-The present-EGNOS. <http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>, 2005. – Besucht: August 2005

Ellis u. Xu 2001

ELLIS, Tim ; XU, Ming: Object Detection and Tracking in an Open and Dynamic World. In: *2nd IEEE Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance (PETS2001)*, 2001

English u. a. 1967

ENGLISH, William K. ; ENGELBART, Douglas C. ; BERMAN, Melvin L.: Display-Selection Techniques for Text Manipulation. In: *IEEE Transaction on Human Factors in Electronics* HFE-8 (1967), Nr. 1, S. 5–15

Feiner u. a. 1997

FEINER, Steven ; MCINTYRE, Blair ; HÖLLERER, Tobias ; WEBSTER, Anthony: A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. In: *Proc. ISWC97 (First IEEE Int. Symp. on Wearable Computers)*, 1997, S. 208–217. – ©1997 IEEE

Floyd 1962

FLOYD, Robert W.: Algorithm 97: Shortest path. In: *Communications of the ACM* 5 (1962), Nr. 6, S. 345

Franz 2004

FRANZ, Walter: Car-to-Car Communication - Anwendungen und aktuelle Forschungsprogramme in Europe, USA und Japan. In: *Fachtagungsbericht GMM*, VDE-Verlag, 2004

Fredman u. Tarjan 1987

FREDMAN, Michael L. ; TARJAN, Robert E.: Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. In: *Journal of the ACM (JACM)* 34 (1987), July, Nr. 3, S. 596–615

Funknavigation 2001

Funknavigation. <http://www.ith-koeln.de/funknavigation.pdf>, November 2001. – Besucht: August 2005

GALILEO 2005

ESA-Navigation-The future-Galileo. <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>, 2005. – Besucht: August 2005

GLONASS 2005

GLONASS. <http://www.glonass-center.ru>, 2005. – Besucht: August 2005

Gonzalez u. Woods 1993

GONZALEZ, Rafael C. ; WOODS, Richard E.: *Digital Image Processing*. Addison Wesley Publishing Company, 1993

Gore 1998

GORE, Al: *The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century*. <http://www.digitalearth.gov/VP19980131.html>, 1998. – Besucht: September 2005

Grejner-Brzezinska 1999

GREJNER-BRZEZINSKA, Dorota A.: Direct Exterior Orientation of Airborne Imagery with GPS/INS System: Performance Analysis. In: *Navigation* 46 (1999), Nr. 4, S. 261–270

Grest u. Koch 2004

GREST, Daniel ; KOCH, Reinhard: Realtime Multi-Camera Person Tracking for Immersive Environments. In: *IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*, 2004

Hart u. a. 1968

HART, Peter E. ; NILSSON, Nils J. ; RAPHAEL, Bertram: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: *IEEE Transaction on Systems Science and Cybernetics* Bd. 4, 1968, S. 100–107

Heck u. a. 1993

HECK, Bernhard ; ILLNER, Michael ; JÄGER, Reiner ; KLEES, Roland ; KUNTZ, Eugen ; MIERLO, Johannes van ; OPPEN, Silke ; SCHMITT, Günter: *GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze*. DVW-Landesverein Baden Württemberg (Hrsg.), Oktober 1993

Heinecke 2004

HEINECKE, Andreas M.: *Mensch-Computer-Interaktion*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004

Heipke 1996

HEIPKE, Christian: Overview of image matching techniques. In: KÖLBL, O. (Hrsg.): *OEEPE - Workshop on the Application of Digital Photogrammetric Workstations, OEEPE Official Publications*, 1996 (33), S. 173–189

Heun 2003

HEUN, Volker: *Grundlegende Algorithmen*. 2. Vieweg Verlag, 2003

Hillenbrand 2004

HILLENBRAND, Thomas: *Microsoft - Benutzeroberfläche Bob: Melindas Mutantenzoo*. <http://www.spiegel.de/netzwelt/netzkultur/0,1518,329307,00.html>, November 2004. – Besucht: November 2004

Horn u. Schunck 1981

HORN, Berthold K. ; SCHUNCK, Brian G.: Determining Optical Flow. In: *Artificial Intelligence* 16 (1981), August, Nr. 1–3, S. 185–203

Ibach u. a. 2004

IBACH, Peter ; HÜBNER, Tobias ; SCHWEIGERT, Martin: MagicMap - Kooperative Positionsbestimmung über WLAN. In: *Proceedings of the 21st Chaos Communication Congress*, 2004, S. 385–392

IMPERIUM-ROMANUM 2005

imperium-romanum.com-Geografie-Meere. http://imperiumromanum.com/geografie/weltbild/oceanus_01.htm, 2005. – Besucht: August 2005

Intel Corporation 2005

INTEL CORPORATION: *Intel Research - Microprocessor Research - Media*. 2005. – Besucht: Januar 2005

Java3D 2005

J3D.ORG - File loader archives. <http://www.j3d.org/utilities/loaders.html>, 2005. – Besucht: August 2004

JDBC 2005

JDBC Technology. <http://java.sun.com/products/jdbc/>, 2005. – Besucht: September 2005

Kampmann u. Renner 2004

KAMPMANN, Georg ; RENNER, Bernd: Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung ausgleichender Ebenen und Geraden. In: *AVN 2004* (2004), 2, S. 56–67

Kim u. a. 2004

KIM, Hyunseok ; LEE, Jang G. ; PARK, Chang G.: *Performance Improvement of GPS/INS Integrated System Using Allan Variance Analysis*. Dezember 2004. – Presented at GNSS2004 - The 2004 International Symposium on GNSS/GPS

Kim u. a. 2003

KIM, Jong H. ; WISHART, Stuart ; SUKKARIEH, Salah: Real-time Navigation, Guidance, and Control of a UAV using Low-cost Sensors. In: *Proceedings of the International Conference of Field and Service Robotics (FSR'03)*, 2003, S. 95–100

Kraus 1997

KRAUS, Karl (Hrsg.): *Photogrammetrie*. Bd. 1. 6. Dümmler/Bonn, 1997

Kwon u. Jekeli 2001

KWON, J.H. ; JEKELI, C.: A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS. In: *Journal of Geodesy* 74 (2001), März, Nr. 10, S. 690–700

L3 SYSTEMS 2005

L3 Systems WristPC Keyboard Page. <http://www.l3sys.com/keybd/keybd.html>, 2005. – Besucht: September 2005

Ladetto u. Merminod 2002

LADETTO, Quentin ; MERMINOD, Bertrand: In Step with INS. In: *GPS World* (2002), Oktober

LaMance u. a. 2002

LAMANCE, Jimmy ; DESALES, Javier ; JARVINEN, Jani: Assisted GPS: A Low-Infrastructure Approach. In: *GPS World* (2002)

Leebmann 2005

LEEBMANN, Johannes: *3D Skizzen in Erweiterter Realität*, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2005. – Eingereicht im Juni 2005

LEICA GEOSYSTEMS 2005

Leica Geosystems. http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_405.htm, 2005. – Besucht: September 2005

LGN 2006

Geodaten und Karten. http://www.lgn.niedersachsen.de/master/C8146883_N8076265_L20_D0_I7746208.html, 2006. – Besucht: April 2006

LGRB Baden-Württemberg 2002

LGRB BADEN-WÜRTTEMBERG: *Georisiken: Aktive Massenbewegungen am Albtrauf*. LGRB-Nachrichten Nr.8/2002, 2002

Libuda u. Kraiss 2004

LIBUDA, Lars ; KRAISS, Karl-Friedrich: Identification of Natural Landmarks for Vision Based Navigation. In: *Conference on Mechatronics and Robotics 2004* Bd. 3, 2004, S. 877–882

Livingston 2006

LIVINGSTON, Mark A.: *Battlefield Augmented Reality System (BARS)*. Naval Research Laboratory, Code 5581, 4555 Overlook Avenue SW, Washington, DC 20375, 2006

Lucas u. Kanade 1981

LUCAS, Bruce D. ; KANADE, Takeo: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI). In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)*, 1981, S. 674–679

Ma 1996

MA, Yi: *Canny edge detector demos*. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~sastry/ee20/cademo.html>, 1996. – Besucht: April 2006

Madsen u. Andersen 1998

MADSEN, Claus B. ; ANDERSEN, Claus S.: Optimal Landmark Selection for Triangulation of Robot Position. In: *Robotics and Autonomous Systems* 23 (1998), Juli, Nr. 4, S. 277–292

Mata u. a. 2001

MATA, Mario ; ARMINGOL, Jose M. ; ESCALERA, Arturo de l. ; SALICHS, Miguel A.: A Visual Landmark Recognition System for Topological Navigation of Mobile Robots. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation* Bd. 2, 2001, S. 1124–1129

McCane 2000

MCCANE, Brendan: *Optical Flow Algorithm Evaluation*. <http://www.cs.otago.ac.nz/research/vision/Research/OpticalFlow/opticalflow.html>, 2000. – Besucht: April 2006

van Mierlo u. Müller 1986

MIERLO, Johannes van ; MÜLLER, Tilmann: Aspekte und Methoden der Planung geodätischer Netze. In: *Beurteilung geodätischer Netze*. Deutscher Verein für Vermessungswesen eV (DVW), 1986, S. 113–127

Myers 1998

MYERS, Brad A.: A Brief History of Human Computer Interaction Technology. In: *ACM interactions* 5 (1998), März, Nr. 2, S. 44–54

NAVSTAR GPS 2005

Navstar GPS Joint Program Office (SMC/GP). <http://gps.losangeles.af.mil/>, 2005. – Besucht: September 2005

NAVTEQ 2005

NAVTEQ:Home. <http://www.navteq.com/>, 2005. – Besucht: November 2005

NMEA 2005

The National Marine Electronics Association. <http://www.nmea.org/>, 2005. – Besucht: Juli 2003

Nojima u. a. 2002

NOJIMA, Takuya ; SEKIGUCHI, Dairoku ; INAMI, Masahiko ; TACHI, Susumu: The SmartTool: A system for augmented reality of haptics. In: *IEEE-Virtual Reality Conference 2002*, 2002, S. 67–72

Noureldin u. a. 2004

NOURELDIN, Aboelmagd ; OSMAN, Ahmed ; EL-SHEIMY, Naser: A neuro-wavelet method for multi-sensor system integration for vehicular navigation. In: *Journal of Measurement Science and Technology* 15 (2004), Februar, S. 404–412

Piekarski 2004

PIEKARSKI, Wayne: *Interactive 3D Modelling in Outdoor Augmented Reality Worlds*, Wearable Computer Lab, School of Computer and Information Science, University of South Australia, Diss., 2004

Plümer u. a. 2004

PLÜMER, Lutz ; SCHMITTWILKEN, Jörg ; KOLBE, Thomas H.: Mobile GIS für die Orientierung von Fußgängern in städtischen Umgebungen. In: *Tagungsband zum Symposium Praktische Kartographie 2004* Bd. 9, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004

Pohl 2004

POHL, Friedrich-Wilhelm: *Die Geschichte der Navigation*. 2. Koehlers Verlagsgesellschaft mbH Hamburg, 2004

Point Grey Research Inc. 2005

Point Grey :: Home. <http://www.ptgrey.com/>, 2005. – Besucht: August 2005

PostgreSQL 2005

The world's most advanced open source database. <http://www.postgresql.org/>, 2005. – Besucht: September 2005

Preim 1999

PREIM, Bernhard: *Entwicklung interaktiver Systeme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999

Rauterberg u. Cachin 1993

RAUTERBERG, Matthias ; CACHIN, Christian: Locating the primary attention focus of the user. In: *Vienna Conference on Human Computer Interaction* Bd. 733, Springer, 1993, S. 129–140

Reitmayer u. Schmalstieg 2003

REITMAYER, Gerhard ; SCHMALSTIEG, Dieter: Collaborative Augmented Reality for Outdoor Navigation and Information Browsing. In: *Geowissenschaftliche Mitteilungen (Proc. 2nd Symposium on Location Based Services and TeleCartography 2004)*, 2003, S. 53–62

Rekimoto 1996

REKIMOTO, Jun: Tilting operations for small screen interfaces. In: *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 1996, S. 167–168

Rodewald u. Schlichting 1988

RODEWALD, Bernd ; SCHLICHTING, Hans-Joachim: Springen, Gehen, Laufen. In: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik* 37 (1988), 12, Nr. 5

Rooney u. a. 2000

ROONEY, S. ; CHIPPENDALE, P. ; CHOONY, R. ; LEROUX, C. ; HONARY, B.: Accurate Vehicular Positioning using a DAB-GSM Hybrid System. In: *Vehicular Technology Conference*, 2000, S. 97–101

Rottensteiner 2001

ROTTENSTEINER, Franz: *Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS*, Technischen Universität Wien, Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik, Diss., 2001

RXTX 2005

RXTX: serial and parallel I/O libraries supporting Sun's CommAPI. <http://www.rxtx.org/>, 2005. – Besucht: September 2005

Salychev 2004

SALYCHEV, Oleg: *Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions*. BMSTU Press Moscow, Russia, 2004

SAPOS 2005

SAPOS-Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung. <http://www.sapos.de/>, 2005. – Besucht: August 2005

Scharf u. Bayer 2002

SCHARF, Dietmar ; BAYER, Rudolf: CoPark - ein mobiler datenbankbasierter Dienst und ein neuartiges Konzept zur Parkraumbewirtschaftung in Ballungszentren. In: HÖPFNER, Hagen (Hrsg.) ; SAAKE, Gunter (Hrsg.): *Mobile Datenbanken und Informationssysteme*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2002, S. 51–55

Seeber u. Schmitz 1996

SEEBER, Günter ; SCHMITZ, Martin: *Methodik der GPS- und DGPS-Messung*. <http://gio.uni-muenster.de/>, 1 1996. – Besucht: März 2006

SIEMENS 2005

Siemens VDO Automotive AG. <http://www.siemensvdo.de/de/index.asp>, 2005. – Besucht: November 2005

Smith 1999

SMITH, Steven W.: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing San Diego, California, USA, 1999

Soliman u. a. 2000

SOLIMAN, Samir ; AGASHE, Parag ; FERNANDEZ, Ivan ; VAYANOS, Alkinoos ; GAAL, Peter ; OLJACA, Milan: gpsOne: A hybrid position location system. In: *Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications* Bd. 1, 2000, S. 330–335

Soloviev u. van Grass 2004

SOLOVIEV, Andrey ; GRASS, Frank van: Applications for General Aviation - Combining Low-Cost Inertial Systems with GPS. In: *GPS World* (2004)

Stanley London 2005

STANLEY LONDON: *Eight-inch Brass Sextant. Stanley London.* <http://www.stanleylondon.com/sext-sm8.htm>, 2005. – Besucht: April 2006

Stichtenoth 1959

STICHTENOTH, Dietrich: *Pytheas von Marseille, Über das Weltmeer: die Fragmente /übers. und erl. von D. Stichtenoth.* Böhlau, 1959

Sukkarieh u. a. 1998

SUKKARIEH, Salah ; NEBOT, Eduardo M. ; DURRANT-WHYTE, Hugh F.: Achieving Integrity in an INS/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Applications. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, S. 3437–3442

Sutherland 1963

SUTHERLAND, Ivan E.: Sketchpad: A man-machine graphical communication system. In: *Proceedings of the Spring Joint Computer Conference*, 1963, S. 329–346

Tanriverdi u. Jacob 2000

TANRIVERDI, Vildan ; JACOB, Robert: Interacting with eye movements in virtual environments. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, ACM Press New York, NY, USA, 2000, S. 265–272

Tao 2000

TAO, C. V.: Mobile Mapping Technology for Road Network Data Aquisition. In: *Journal of Geospatial Engineering* 2 (2000), Dezember, Nr. 2, S. 1–13

The Aerospace Corporation 2005a

THE AEROSPACE CORPORATION: *GPS Elements.* <http://www.aero.org/education/primers/gps/elements.html>, 2005. – Besucht: November 2004

The Aerospace Corporation 2005b

THE AEROSPACE CORPORATION: *GPS Elements.* <http://www.aero.org/education/primers/gps/whatisgps.html>, 2005. – Besucht: November 2004

Thomas u. Piekarski 2002

THOMAS, Bruce ; PIEKARSKI, Wayne: Glove Based User Interaction Techniques for Augmented Reality in an Outdoor Environment. In: *Virtual Reality: Research, Development and Application* 6 (2002), Nr. 3, S. 176–180

Tomasi u. Manduchi 1998

TOMASI, Carlo ; MANDUCHI, Roberto: Bilateral Filtering for Gray and Color Images. In: *ICCV*, 1998, S. 839–846

Torge 2003

TORGE, Wolfgang: *Geodäsie*. 2. Walter de Gruyter Berlin, New York, 2003

TRIMBLE 2005

Trimble. <http://www.trimble.com/>, 2005. – Besucht: September 2005

Vlahakis u. a. 2002

VLAHAKIS, Vassilios ; IOANNIDIS, Nikolaos ; KARIGIANNIS, John ; TSOTROS, Manolis ; GOUNARIS, Michael: Virtual Reality and Information Technology for Archaeological site promotion. In: *5th International Conference on Business Information Systems (BIS02)*, 2002. – ISBN 83-916842-0-2

Wagner 2003

WAGNER, Daniel: *Handheld Augmented Reality - Augmented Reality on truly mobile devices*. http://studierstube.icg.tu-graz.ac.at/handheld_ar/signpost.php, 2003. – Besucht: September 2005

Wang u. a. 2003

WANG, Jinling ; LEE, H.K. ; RIZOS, C.: GPS/INS integration: A performance sensitivity analysis. In: *Wuhan University Journal of Nature Sciences* 8 (2003), Nr. 2B, S. 508–516

Warshall 1962

WARSHALL, Stephen: A Theorem on Boolean Matrices. In: *Journal of the ACM* 9 (1962), Nr. 1, S. 11–12

Web3D Consortium 2005

WEB3D CONSORTIUM: *Web3D Consortium - Open Standards for Real-Time 3D Communication*. <http://www.web3d.org/>, 2005. – Besucht: Oktober 2004

Wilson 2005

WILSON, Andrew (Hrsg.): *Galileo - The European Programme for Global Navigation Services*. ESTEC, PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands : ESA Publications Division, 2005

Wörn u. a. 1998

WÖRN, Heinz (Hrsg.) ; DILLMANN, Rüdiger (Hrsg.) ; HENRICH, Dominik (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 1998*. Springer Verlag, 1998

Xj3D 2005

The Xj3D Project. <http://www.xj3d.org/>, 2005. – Besucht: Oktober 2004

Xsens 2005

Xsens Motion Technologies-miniature inertial motion sensors. <http://www.xsens.com/>, 2005. – Besucht: August 2005

Yuen u. MacDonald 2002

YUEN, David C. ; MACDONALD, Bruce A.: Natural landmark based localisation system using panoramic images. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'02)* Bd. 1. Washington DC, May 2002, 915–20

Zogg u. Živadinović 2004

ZOGG, Jean-Marie ; ŽIVADINOVIĆ, Dušan: GPS im Haus. In: *c't Magazin für Computertechnik* (2004), Nr. 20, S. 222–226

Dank

Den folgenden Personen, welche mich bei der Fertigstellung meiner Dissertation unterstützt haben, gebührt mein persönlicher Dank:

Herrn Professor Bähr, Leiter des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der Universität Karlsruhe (TH), für die Betreuung meiner Arbeit.

Herrn Professor Dillmann für die Übernahme des Korreferats, sowie die mir eingeräumten Freiräume bei der Ausarbeitung dieser Dissertation.

Weiterhin Herrn Dr. Wiesel, Leiter des Projektes am Institut, für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Dr. Coelho und Herrn Dr. Leebmann die das Grundgerüst des Systems entworfen haben und mir bei der Entwicklung meiner Lösungen stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meiner Familie und meinen Freunden. Ohne ihre Unterstützung und dem mir entgegengebrachten Vertrauen wäre Vieles ungleich schwerer gewesen.

Herzlichen Dank!