

Indoor navigation mit mobilen Endgeräten

Indoor Navigation with Mobile Devices

Konstantin Klinger

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Pawelczak

Masterarbeit

eingereicht im August 2016

Erklärung

gemäß Beschluss des Prüfungsausschusses für die Fachhochschulstudiengänge der UniBwM vom 25.03.2010

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, insbesondere keine anderen als die angegebenen Informationen.

Der Speicherung meiner Masterarbeit zum Zweck der Plagiatsprüfung stimme ich zu. Ich versichere, dass die elektronische Version mit der gedruckten Version inhaltlich übereinstimmt.

Neubiberg, den 19.08.2016

Konstantin Klinger

Kontakt: B. Eng. Konstantin Klinger
Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Technische Informatik und Elektrotechnik
Masterstudiengang: Computer Aided Engineering
klingerkonstantin@gmail.com

Prof. Dr.-Ing. Dieter Pawelczak
Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Technische Informatik und Elektrotechnik
Institut für Software Engineering
dieter.pawelczak@unibw.de

Abstract

For the purpose of reaching a destination on the shortest path and as quickly as possible, applications on mobile devices have become a companion of everyday life to navigate outdoors. Inside buildings, these systems don't work up to now. Basically, people have to rely on signs and plans with location markers which are most common at shopping malls, museums, university buildings or airports. The need for indoor navigation on smartphones and tablets rises continuously and the interest in the area of research grows. With regards to motion tracking, area learning and depth perception, the Tango technology is an innovative solution from Google for mobile devices. This technology determines the relative position of the used devices continuously and works without any additional external hardware.

Concerning indoor navigation technology and science, this thesis provides an overview of the State of the art. For this reason, various localization techniques, data models and routing methods are analyzed in the context of indoor navigation using mobile devices. Afterwards, the development process of a mapping application for Google's Project Tango is described which creates two-dimensional floor plans and an indoor navigation graph of the environment. The collected data will form the basis for the subsequent indoor navigation system. Comparing the calculated blueprint lengths and reference measurements of a laser distance instrument, the data reach an average accuracy about 97 percent. The accuracy of the measurement is depended on the lighting conditions, transparent objects and deviations in the internal localization of the Tango device.

Zusammenfassung

Außerhalb geschlossener Räume sind Navigationsanwendungen auf mobilen Endgeräten zu alltäglichen Begleitern geworden, um möglichst schnell und auf kürzestem Weg zu einem gewünschten Zielort zu gelangen. Doch innerhalb von Gebäuden funktionieren diese Systeme bisher noch nicht in gewohnter Weise. In Einkaufscentern, Museen, Universitätsgebäuden oder an Flughäfen wird in der Regel auf Hinweisschilder und Gebäudepläne mit Standortmarkierung zurückgegriffen. Jedoch steigt das Bedürfnis gewohnte Navigationsapplikationen auf dem Smartphone oder Tablet auch in Innenbereichen nutzen zu können, weshalb das Interesse am Forschungsgebiet der Indoornavigation stetig zunimmt. Die Tango-Technologie ist eine innovative Lösung von Google, die Bewegungsverfolgung, Umgebungswiedererkennung und Tiefenwahrnehmung auf Smartphones und Tablets ermöglicht. Die relative Gerätelocation kann kontinuierlich und ohne zusätzlich erforderliche, externe Hardwarestrukturen bestimmt werden.

Diese Arbeit bietet eine geordnete Übersicht über den aktuellen technologischen Stand der Indoornavigation. Hierfür werden diverse Lokalisierungstechniken, Datenmodelle und Routingverfahren im Kontext der Navigation mit mobilen Endgeräten innerhalb von Gebäuden analysiert. Anschließend folgt die Beschreibung der Entwicklung einer Kartierungsapplikation für Googles Project Tango, die zweidimensionale Gebäudepläne und einen Indoornavigationsgraphen der Umgebung erzeugt. Diese Daten sollen die Grundlage für ein nachfolgendes Navigationssystem darstellen. Bei Vergleich der, von der Anwendung berechneten, Längenangaben mit Referenzmessungen eines Laser-Entfernungsmessgeräts liegt die Genauigkeit bei durchschnittlich 97 Prozent. Den größten Einfluss auf die Messungen haben dabei die bestehenden Lichtverhältnisse, transparente Objekte und Differenzen in der internen Positionsbestimmung des Tango-Gerätes.

Danksagung

Ein großer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Pawelczak für die hervorragende Betreuung und Unterstützung während des Verfassens dieser Masterarbeit.

Ebenfalls möchte ich mich beim gesamten Institut für Software Engineering für die Bereitstellung des Project Tango Entwicklungstablets und bei Frau Prof. Dr. Andrea Baumann bedanken, die mich zu dem Thema Indoornavigation geführt hat.

Zudem geht mein Dank an Günter, der mir das Laser-Entfernungsmessgerät für die Referenzmessungen zur Verfügung gestellt hat.

Besonders möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und bei Nicole bedanken, ohne deren großartige Unterstützung und Geduld diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Gliederung.....	1
2 Einführung.....	3
2.1 Überblick.....	3
2.2 Komponenten eines Indoornavigationssystems	5
2.3 Unterschied Outdoor- und Indoornavigation	6
3 Lokalisierung.....	9
3.1 Grundlagen.....	9
3.1.1 Begriffe.....	9
3.1.2 Messprinzipien	11
3.1.3 Positionierungstechniken	12
3.1.4 Multisensorfusion (Kalman-Filter)	15
3.2 Technologien.....	17
3.2.1 Überblick.....	17
3.2.2 Radiowellen.....	19
3.2.3 Inertiale Odometrie	23
3.2.4 Visuelle Odometrie	25
4 Datenbank.....	29
4.1 Kartografie	29
4.1.1 Kartierungstechniken	30
4.1.2 Graphische Repräsentation.....	32
4.2 Datenformate.....	33
4.2.1 OpenStreetMap (OSM)	33
4.2.2 IFC.....	34
4.2.3 CityGML	34
4.2.4 IndoorGML	35
4.3 Map Matching	38

5 Routing	39
5.1 Überblick.....	39
5.1.1 Arten der Routenplanung	39
5.1.2 Präsentation der Routen	40
5.2 Algorithmen	41
5.2.1 Routingverfahren.....	41
5.2.2 Graphische Struktur und Auswahl des Verfahrens	42
6 Project Tango	45
6.1 Überblick der Technologie.....	45
6.2 Geräte und Hardware	45
6.3 Konzepte	47
6.3.1 Motion Tracking.....	47
6.3.2 Area Learning.....	48
6.3.3 Depth Perception	49
7 Entwicklung einer Kartierungsapplikation.....	51
7.1 Konzept	51
7.1.1 Rahmenbedingungen	52
7.1.2 Modellierung eines Indoornavigationsgraphen	52
7.1.3 Implementierung	54
7.2 Evaluation	63
7.2.1 Benutzeroberfläche (GUI).....	63
7.2.2 Bewertung der Gebäudepläne	65
7.2.3 Verifikation des Indoornavigationsgraphen	69
7.3 Integration in den Local Area Guide.....	71
8 Zusammenfassung.....	73
8.1 Fazit.....	73
8.2 Ausblick	74
8.3 Schlusswort	75
9 Anhang	77
9.1 Referenzmessungen	77
9.1.1 Beispielgebäude 1: Universität der Bundeswehr München	77
9.1.2 Beispielgebäude 2: 4-Zimmer-Wohnung in Erding	81

9.2 Indoornavigationsgraph	85
9.2.1 Beispielgebäude 1: Universität der Bundeswehr München	85
9.2.2 Beispielgebäude 2: 4-Zimmer-Wohnung in Erding	90
9.3 Gliederung der beigelegten DVD	94
Abbildungsverzeichnis	95
Tabellenverzeichnis	98
Formelverzeichnis	99
Literaturverzeichnis.....	100

1 Einleitung

1.1 Motivation

„Why can we find our way to the moon, but get lost at the mall?“

- Colin Ellard [1]

In der heutigen Informationsgesellschaft ist die Navigation mit Hilfe eines Smartphones selbstverständlich, sodass die veränderte Situation beim Betreten eines Gebäudes einen beträchtlichen Unterschied in der Nutzung von Navigationssystemen darstellt. Trotz aller technologischen Errungenschaften verlaufen sich die Menschen immer noch in Einkaufszentren, Flughäfen und anderen großen, unbekannten Gebäuden, was Colin Ellard schon 2009 mit dem einprägsamen Untertitel seines Buches „You are Here“ betonte. In diesem erkundet er die menschliche Navigation in psychologischem, philosophischem und anthropologischem Kontext. Außerhalb von geschlossenen Räumen haben sich auf GPS (engl. Global Positioning System) beruhende Navigationsanwendungen, wie zum Beispiel Google Maps, mit mobilen Endgeräten etabliert und diese Lokalisierungstechnologie als Standard gefestigt. Innerhalb von Gebäuden werden zu diesem Zweck, aufgrund der Abwesenheit von GPS-Signalen, andere Techniken benötigt. Jedoch hat sich bisher kein System bzw. keine Technologie durchgesetzt. Das stetig wachsende Forschungsgebiet der Indoornavigation beschäftigt sich mit Lösungen dieser Problematik, um moderne Alternativen zu Hinweisschildern und Gebäudeplänen in Innenbereichen anbieten zu können.

1.2 Gliederung

Ziel dieser Arbeit ist es, dem Leser einerseits einen Überblick über den aktuellen Stand der Indoornavigation zu geben und andererseits die Frage zu beantworten, ob Googles Project Tango eine Lösung für diese Thematik darstellen könnte. Unstrukturierte und widersprüchliche Literatur führte zu der Idee, eine geordnete Übersicht zu erstellen. Dabei wird versucht detailliert über alle relevanten Gebiete mit der entsprechenden Abstraktion zu berichten und den Schwerpunkt auf Technologien zu setzen, die sich mit gewöhnlichen mobilen Endgeräten, wie Smartphones und Tablets, verwenden lassen. Zunächst werden in einer Einführung die einzelnen Komponenten eines Indoornavigationssystems erläutert und der Unterschied zur Outdoornavigation gezogen (Kap. 2). Anschließend werden die Bereiche Lokalisierung (Kap. 3), Datenbank bzw. Kartografie (Kap. 4) und Routing (Kap. 5) in eigenen Abschnitten ausgeführt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird Googles Project Tango vorgestellt (Kap. 6) und anschließend die Entwicklung einer Applikation zur Kartografie von Innenraumumgebungen und Erzeugung von zweidimensionalen Gebäudeplänen und eines Indoornavigationsgraphen mit dieser Technologie beschrieben. Zudem wird die Erweiterung des bestehenden Local Area Guides der Universität der Bundeswehr München auf Innenbereiche diskutiert (Kap. 7). Abschließend werden die Ergebnisse dieser Ausarbeitung bewertet und in einem Ausblick mögliche zukünftige Entwicklungen betrachtet (Kap. 8).

2 Einführung

Die folgende Einführung beschreibt in einer Übersicht zunächst die besonderen Umstände bei der Navigation in Innenbereichen und erläutert die Problematik bei der Verwendung von GPS als Lokalisierungstechnologie (Kap. 2.1). Anschließend werden die einzelnen Komponenten eines Indoornavigationssystems (Kap. 2.2) betrachtet und Differenzen zur Outdoornavigation gezogen (Kap. 2.3).

2.1 Überblick

Das Gebiet der Indoornavigation ist nicht neu. Das Bedürfnis gewohnte Navigationsapplikationen, wie beispielsweise Google Maps, auch innerhalb von Gebäuden zu verwenden, ist schon länger vorhanden. Jedoch existiert bisher kein einheitlicher Standard, sondern lediglich zahlreiche Insellösungen. Das Smartphone als ständiger Begleiter unseres alltäglichen Lebens kann für zahlreiche Anwendungen als Navigationssystem im Innenbereich genutzt werden. In großen, unbekannten Umgebungen wie Flughäfen, Einkaufszentren oder komplex konstruierten Gebäuden verlassen sich die Menschen derzeit in der Regel auf Hinweisschilder und Gebäudepläne mit Standortmarkierungen, um zu einem bestimmten Ziel zu gelangen. Dies kann unter Umständen zu Verspätungen führen, falls der korrekte Weg nicht sofort gefunden wird oder Umwege gegangen werden. Die Indoornavigation kann diese Herausforderung bewältigen und dazu auch körperlich beeinträchtigten Personen, wie Sehbehinderten oder Rollstuhlfahrern, das Durchqueren eines Gebäudes erleichtern, indem beispielsweise der kürzeste barrierefreie Weg berechnet wird. Auch in Notfallsituationen kann ein solches System die Mobilität verbessern und entworfene Evakuierungsrouten bereitstellen. Eine Vision des Forschungsgebietes ist die sog. universale Navigation. Diese soll zu jeder Zeit, an jedem Ort und für sämtliche Benutzertypen zur Verfügung stehen. Der Schwerpunkt der Forschung liegt dort derzeit auf dem nahtlosen Übergang zwischen Outdoor- und Indoornavigation. Seit 2010 gibt es zudem mit der IPIN (engl. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation) eine jährlich tagende Konferenz der IEEE-Organisation (engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers), die sich mit der Thematik befasst.

Navigationsgeräte sind zum alltäglichen Standard geworden. Seit Jahrhunderten gibt es bereits Geräte zur Orientierungshilfe. Die Entwicklung reicht vom Kompass in den frühen Anfängen bis hin zu GPS seit Mitte der 1980er Jahre als globales Positionsbestimmungssystem. Diese Technologie deckt die gesamte Erde global ab, ist kostengünstig in Verbrauchergeräten verbaut und ist zu einem Synonym für Navigation geworden. In der Realität ist GPS aber lediglich eine

Komponente eines Navigationssystems. Innerhalb von Gebäuden gibt es zahlreiche variierende Herausforderungen bei der Positionsbestimmung. Die ausgesendeten Radiowellen des globalen Navigationssatellitensystems (GPS) erfahren dort eine starke Abnahme ihrer Signalstärke, die eine Lokalisierung mit der erforderlichen Genauigkeit nicht mehr möglich macht. Durch die Gebäudebegrenzungen besteht keine direkte Sichtverbindung zu den Satelliten. Außerdem verursacht die Mehrwegeausbreitung im Innenbereich Schwierigkeiten bei Zeit- und Richtungsmessungen ankommender Signale. Dies wird in Kapitel 3.1 näher beschrieben.

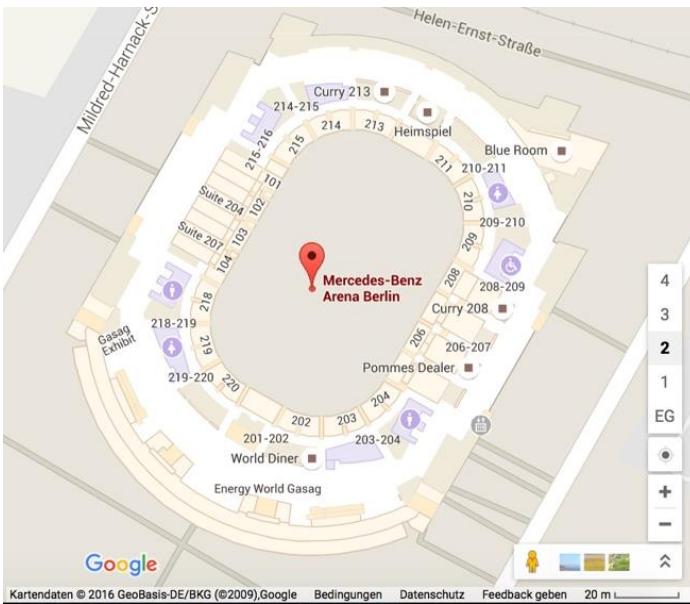


Abbildung 2-1: Google Maps: Mercedes-Benz-Arena Berlin mit Gebäudeplänen für jedes Stockwerk [2]

Google und Apple bieten in ihren Navigationsanwendungen bisher nur teilweise Karten für den Innenbereich an, wie zum Beispiel für die Mercedes-Benz-Arena in Berlin (Abbildung 2-1). Eine Lokalisierung innerhalb dieser Karten ist derzeit noch nicht möglich. Dazu müsste eine speziell für den Innenbereich entwickelte Technik implementiert werden. Durch die eingeschränkte Genauigkeit des globalen Positionsbestimmungssystems der Outdoornavigation kann der exakte Standort nicht ermittelt werden. Ob sich der Benutzer innerhalb oder außerhalb eines Gebäudes befindet und in welchem Stockwerk er sich aufhält, bleibt unbekannt. Die derzeit gebräuchlichen Navigationsapplikationen von Apple und Google liefern lediglich die Information, ob sich das zu ortende Gerät bei einem Gebäude befindet. Speziell seit dem Aufschwung des Smartphonemarktes wird die Lokalisierungsgenauigkeit der Navigationsapplikationen für den Außenbereich durch die zusätzliche Nutzung von WLAN-Signalen (engl. Wireless Local Area Network) zumindest ein wenig erhöht. Des Weiteren sind die Koordinatensysteme in Indoornavigationssystemen nicht standardisiert. In der Regel werden lokale Koordinaten verwendet, die an sog. Zugangspunkten (z.B. Haupteingang eines Gebäudes) mit globalen verknüpft werden. Alle Punktpaare innerhalb eines Gebäudes geben die Position somit nur relativ wieder. Dazu darf der Datenschutz nicht unerwähnt bleiben. Nicht jeder Eigentümer möchte Informationen über den Innenbereich seines Gebäudes öffentlich zugänglich machen. [3, 4]

2.2 Komponenten eines Indoornavigationssystems

Unabhängig von den Details der verwendeten Techniken zeigt Abbildung 2-2 die Komponenten eines typischen Indoornavigationssystems und veranschaulicht den Informationsfluss zwischen den jeweiligen Modulen. Eine Benutzeranfrage nach einer Wegbeschreibung wird von der Routingkomponente (Kap. 5) bearbeitet, die eine Route zwischen der aktuellen Position des Benutzers und einem gewünschten Zielort berechnet. Dabei wird der derzeitige Standort von der Lokalisierungskomponente (Kap. 3) ermittelt, die auf einer speziellen Technik zur Positionsbestimmung in Innenbereichen basiert. Diese zwei Hauptaktivitäten benötigen eine grundlegende Datenbank (Kap. 4), ein Netzwerk über die navigierbaren Segmente in einem Gebäude (z.B. Gänge, Räume) und deren Verbindungen. Dabei werden CAD-Anwendungen (engl. Computer-Aided Design), die ein zwei- oder dreidimensionales Layout von jedem Stockwerk mit hohem Detailgrad liefern, mit BIM-Methoden (engl. Building Information Modelling) kombiniert. Diese Gebäudedatenmodellierung enthält Informationen über Geometrie, Topologie, Größe und Eigenschaften der Innenbereiche. Bisher gibt es jedoch kein einheitliches, standardisiertes Datenformat. Die berechneten Ergebnisse werden abschließend typischerweise in Form von einer Kartendarstellung visualisiert, die dem Benutzer präsentiert wird. Es gibt verschiedene Arten der Interaktion zwischen Nutzer und Navigationssystem. Die Applikation stellt dem Benutzer die aktuelle Position oder eine Wegbeschreibung auf einer zwei- oder dreidimensionalen Karte in Form von eingezeichneten Punkten, Linien oder Pfeilen dar. Alternativ können auch Bilder der Umgebung angezeigt werden. Dazu kann die Benutzerbewegung auch mittels Sprach- und Textanweisungen geleitet oder durch zusätzliche haptische Signale verbessert werden. Beispielsweise weist Apples „Watch“ in der integrierten Navigationsapplikation durch Vibration auf eine notwendige Richtungsänderung des Nutzers hin. Der Anwender interagiert mit einer mobilen Navigationsapplikation typischerweise mittels Sprachanweisungen oder durch händische Eingaben auf dem Touchscreen des Gerätes. [3, 4]

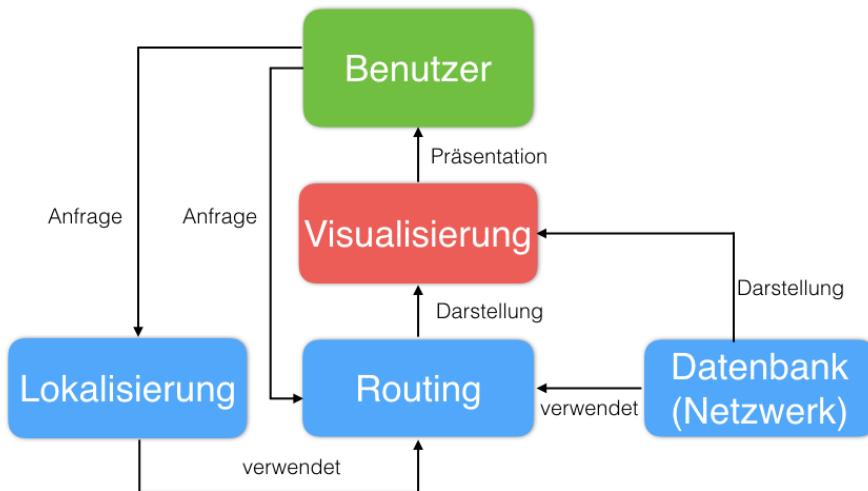


Abbildung 2-2: Komponenten eines Indoornavigationssystems als Informationsflussdiagramm [5]

2.3 Unterschied Outdoor- und Indoornavigation

Tabelle 2-1: Vergleich zwischen Outdoor- und Indoornavigation mit mobilen Endgeräten (abgewandelt und ergänzt nach [6])

Unterscheidungs-kriterium	Outdoornavigation	Indoornavigation
<i>Fortbewegungsart</i>	Fahren (Auto, Motorrad, Fahrrad, Rollstuhl), Gehen	Gehen, Rollstuhlfahren
<i>Ort von Interesse (engl. Point of Interest – POI)</i>	Gebäude, Restaurant, Tankstelle, Hotel, Museum, etc.	Raum, Toilette, Geschäft, Terminal, etc.
<i>Beeinflussende Faktoren bei der Navigation</i>	Wetter, Verkehr, Unfälle, Baustellen	Renovierungen, Verkehr, Öffnungszeiten, Zutrittsrechte
<i>Datenbank</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>GIS</u>: Straßen- und Gehwegsegmente, Straßentyp, Breite, Länge, Geschwindigkeitsbegrenzung • <u>Netzwerk</u>: Straße, Gehwege 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>CAD / BIM</u>: Gangsegment, Breite, Länge, Höhe • <u>Netzwerk</u>: Gänge
<i>Skalierung</i>	Nachbarschaft, Stadt, Landkreis, Bundesland, Land	Gebäude
<i>Kartenkomplexität</i>	<u>Horizontal</u> : Ebene (2D)	<u>Horizontal / Vertikal</u> : Ebene oder räumliche Ansicht mit Unterscheidung der Stockwerke (2,5D – 3D)
<i>Erforderliche Genauigkeit</i>	~10 m	~1 m
<i>Routing</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Optimale Route</u>: kürzeste, schnellste, geringster Verkehr, schönste Landschaft • <u>Problemgröße</u>: großes bis sehr großes Netzwerk • <u>Rechenaufwand</u>: gering bis sehr hoch 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Optimale Route</u>: kürzeste • <u>Problemgröße</u>: kleines Netzwerk • <u>Rechenaufwand</u>: gering

Um die Komplexität der Thematik Indoornavigation korrekt einordnen zu können, ist es ratsam eine Abgrenzung zum ausgeprägten Gebiet der Outdoornavigation zu ziehen. Während in gewöhnlichen Navigationssystemen auf GPS als allgemeine Lokalisierungstechnologie zurückgegriffen wird, werden innerhalb von Bauwerken, aufgrund der Abwesenheit von GPS-Signalen, andere Lösungen benötigt. Tabelle 2-1 vergleicht beide Systeme hinsichtlich unterschiedbarer Kriterien in der Navigation und im Routing.

Zum einen müssen alle möglichen Bewegungsarten betrachtet werden. Während außerhalb geschlossener Räume in der Regel beim Auto-, Motorrad-, Fahrrad- und Rollstuhlfahren oder beim Gehen auf Fußgängerwegen ein Navigationssystem verwendet wird, benutzt man diese in Gebäuden bei der Fortbewegung entweder zu Fuß oder im Rollstuhl. Ein sog. Ort von Interesse (engl. Point of Interest – POI) ist in einem Bürokomplex beispielweise ein bestimmter Raum oder eine Toilette. An einem Flughafen könnten ferner Geschäfte und Terminals attraktive Punkte darstellen. Das Ausmaß des Gebäudes ist also das entscheidende Kriterium. In der Outdoornavigation möchte der Benutzer hingegen evtl. auf berühmte Sehenswürdigkeiten, Tankstellen, Museen oder Restaurants aufmerksam gemacht werden. Der Unterschied beider Navigationsarten ist hier also weniger gravierend. Zudem wird im Außenbereich die Navigation von Wetter, Verkehr, Unfällen und Baustellen beeinflusst, während Renovierungen, Öffnungszeiten oder Zutrittsberechtigungen einen Grund darstellen, weshalb eine Route in einem Indoornavigationssystem Abwandlungen erfahren könnte. Allerdings werden auch in Innenbereichen verkehrsleitende Routingverfahren eingesetzt, um beispielsweise an Flughäfen größere Menschenmengen sinnvoll auf verschiedenen Wegen aufzuteilen. Geoinformationssysteme (engl. Geographic Information System – GIS) bzw. verknüpfte Straßen- und Gehwegsegmente sind Hauptbestandteil eines Netzwerkes für die Outdoornavigation. GPS liefert Positionsinformationen in Echtzeit, während GIS diese Daten verwendet, um Navigationsfunktionen bereitzustellen. Verbundene Gänge bilden indessen die Grundlage der Datenbank eines Gebäudes, die mittels CAD- und BIM-Techniken verwaltet werden. Ferner besteht ein Unterschied in der Skalierung bzw. den Zoomoptionen der Kartendarstellung. In der Outdoornavigation kann die Ansicht bis zur Weltkarte verkleinert werden, während innerhalb eines Gebäudes das System zumeist auf dieses beschränkt ist. Die Indoornavigation muss zudem nicht nur zweidimensionale Karten (2D) zur Verfügung stellen, sondern zumindest einen Wechsel zwischen verschiedenen Stockwerken anbieten (2,5D) oder gar eine dreidimensionale Darstellung (3D) verwenden. Ein weiteres Unterscheidungskriterium beider Navigationssysteme ist die erforderliche Genauigkeit. In der Outdoornavigation genügt eine Positionsbestimmung mit einer geringeren Fehlerrate als zehn Meter. Innerhalb eines Gebäudes sind jedoch exaktere Lokalisierungstechnologien unabdingbar, die die Position eines mobilen Endgeräts mit einer Abweichung von etwa einem Meter angeben, da ansonsten eine Wegplanung zu einem bestimmten Raum nicht möglich wäre. Die optimale Route außerhalb geschlossener Räume ist, je nach Benutzerwunsch, die mit der kürzesten Distanz, schnellsten Ankunftszeit, dem geringsten Verkehr oder mit der schönsten Landschaft. Zur Routen-

berechnung wird ein großes bis sehr großes Netzwerk betrachtet und der Rechenaufwand kann ggf. sehr hoch sein. Bei der Indoornavigation ist die optimale Route in der Regel auch die kürzeste der entsprechenden Fortbewegungsart, das Netzwerk ist auf einen kleinen Bereich beschränkt und das Routing benötigt folglich nur geringe Ressourcen. Bei der Reiseplanung mit dem Auto von München nach Cagliari (Sardinien, Italien) muss ein Algorithmus beispielsweise viel mehr Möglichkeiten und Umstände in Betracht ziehen als bei der Wegfindung auf dem Campus einer Universität vom Eingang eines großen Lehrgebäudes zum Büro einer Professorin oder eines Professors. [7]

3 Lokalisierung

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der Lokalisierungskomponente, die mit dem Routing und der Datenbank die Basis eines Indoornavigationssystems bildet (Abbildung 2-2). Zu Beginn werden die wichtigsten, grundlegenden Begriffe, Messprinzipien und Positionierungstechniken erläutert und mit dem Kalman-Filter das bekannteste Verfahren zur Multisensorfusion beschrieben (Kap. 3.1). Diese Grundlagen werden für die im Anschluss dargelegten Technologien zur Lokalisierung innerhalb von Gebäuden (Kap. 3.2) benötigt. Dabei liegt der Fokus auf der Indoornavigation mit mobilen Endgeräten. Nähere Informationen zu weiteren Techniken sind den angeführten Referenzen zu entnehmen.

3.1 Grundlagen

3.1.1 Begriffe

a) Sichtverbindung (LOS) und Nicht-Sichtverbindung (NLOS)

Falls ein Signal in einer direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger ohne Ablenkungen oder Durchqueren von Hindernissen übertragen werden kann, wird dies als Line of Sight (LOS) bezeichnet. Sofern dies nicht zutrifft, wird von einer Nicht-Sichtverbindung (engl. Non Line of Sight - NLOS) gesprochen. Viele Lokalisierungstechnologien benötigen eine LOS-Verbindung. Jedoch herrscht in Innenraumumgebungen aufgrund von Wänden, Möbeln und Personen häufig kein Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger, weshalb dies bei der Wahl der Technologie berücksichtigt werden muss. Abbildung 3-1 visualisiert am Beispiel eines rechtwinkligen Ganges beide Situationen. [8]

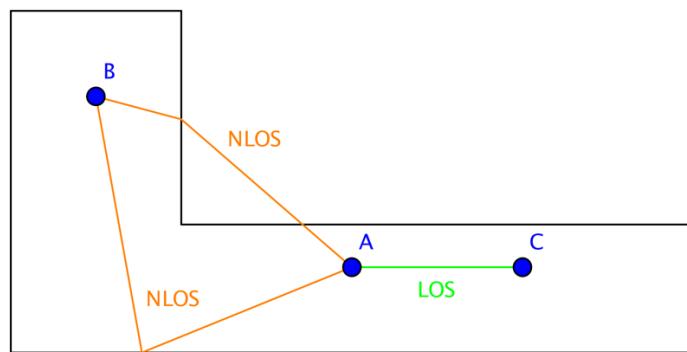


Abbildung 3-1: LOS zwischen Station A und C, NLOS zwischen Station A und B

b) Mehrwegeausbreitung bzw. -empfang

Der Effekt der sog. Mehrwegeausbreitung bzw. des Mehrwegeempfangs (engl. Multipath) beschäftigt sich mit dem Erreichen verschiedener Pfade (Echos) desselben Signals zu unterschiedlichen Zeitpunkten am Empfänger. Abbildung 3-2 zeigt ein Beispiel für ein Signal, das über drei verschiedene Wege von Station A zu einem Empfänger B gelangt. Radiowellen breiten sich vom Sender in alle Richtungen aus und werden auf ihrem Weg von Objekten in andere Bewegungsrichtungen, als die ursprüngliche, geleitet und in ihrer Signalstärke gedämpft. Der Grad der Abschwächung und Ablenkung hängt vom Material, der Struktur und der Dicke des Hindernisses und von der Frequenz bzw. der Wellenlänge des Signals ab. Dabei wird zwischen Reflexion, Beugung, Streuung und Fading unterschieden. Bei dicken Metallwänden oder Stahlträgern in Gebäuden können Radiosignale eine so starke Dämpfung erfahren, dass das Empfangsmodul diese nicht mehr verwerten kann. Jedoch durchdringen Radiowellen die meisten Hindernisse oder finden einen Weg um diese herum. Derartig reflektierte, gebeugte, gestreute oder geschwundene Signale besitzen eine längere Übertragungszeit vom Sender zum Empfänger als der direkte, sichtbare Pfad (LOS). Außerdem unterscheiden sich die Einfallsinkel (engl. Angle of Arrival - AOA) und durch den zusätzlichen Weg wird die ankommende Signalstärke (engl. Receiving Signal Strength – RSS) reduziert. Es sind also sowohl zeit- als auch winkel- und amplitudenbasierte Messtechniken vom Effekt des Mehrwegeempfangs betroffen. Durch die Vermischung des direkten Signals mit den zeitlich verzögerten Echos wird ein Mehrwege-Ausbreitungsmodell benötigt, das die ankommenden Signale durch spezielle Antennensorik voneinander trennt und anhand verschiedener Berechnungsvorschriften für LOS- und NLOS-Pfade die Reisezeit des direkten Weges ermittelt. Die Ungenauigkeit dieser Schätzung wird durch diverse Methoden möglichst gering gehalten. Beispielsweise variieren NLOS-Pfade unvorhersehbar bei Bewegung des Empfangsobjektes, während der geradlinige Weg (LOS) direkt davon beeinflusst wird. Deshalb wird die Mittelwertsbildung über die Zeit häufig verwendet, um den Mehrwegeeffekt zu reduzieren. Weitere Verfahren zur Minderung sind in den nachfolgenden Referenzen zu finden. [8, 9, 10]

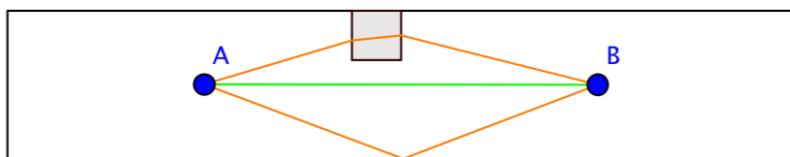


Abbildung 3-2: Mehrwegeausbreitung eines Signals zwischen Station A und B

3.1.2 Messprinzipien

a) Dead Reckoning

Dead Reckoning (engl. für Koppelnavigation) bezeichnet eine Messtechnik zur Bestimmung von relativen Positionsinformationen. Der Ausdruck leitet sich aus dem Englischen von „deduced reckoning“ ab und bedeutet wörtlich übersetzt etwa „abgeleitete Berechnung“. Dabei wird die relative Änderung der Position und Orientierung in Bezug auf eine bekannte Startposition aus der Bewegung eines mobilen Endgeräts ermittelt. Bei bekanntem Startpunkt kann so ein Schätzwert für die aktuelle Position bestimmt werden. Die Genauigkeit dieser Schätzung sinkt zunehmend mit der Laufzeit, wie in Abbildung 3-3 zu sehen ist. Derartige Systeme können eigenständig ablaufen und benötigen keine externe Infrastruktur. Es gibt zahlreiche Lokalisierungstechnologien, die auf dieser Methodik beruhen, wie beispielsweise die Inertiale (Kap. 3.2.3) und Visuelle Odometrie (Kap. 3.2.4). Historisch ist diese Technik der Koppelnavigation aus der Schifffahrt schon seit Jahrhunderten bekannt. Dort wurde die Relativgeschwindigkeit im Wasser durch ein, an einer Schnur befestigtes, bleibeschwertes Holzbrett berechnet. [8, 11]

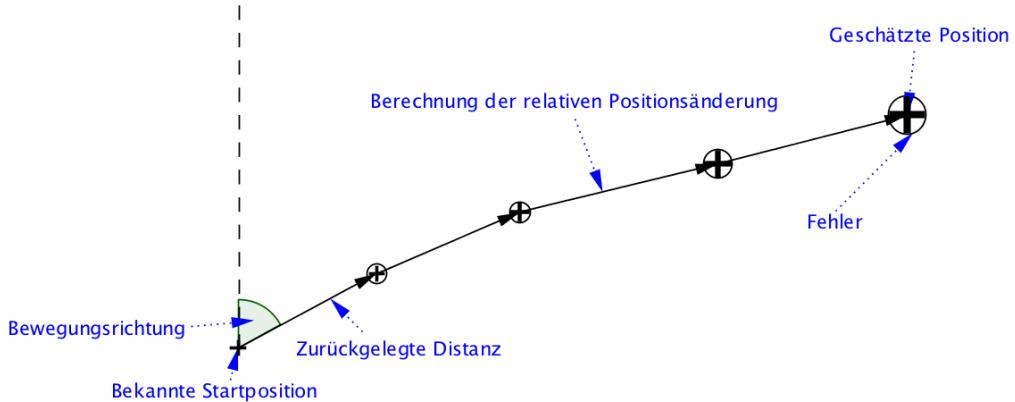


Abbildung 3-3: Prinzip der Koppelnavigation (engl. Dead Reckoning) [12]

b) Time of Arrival (TOA) / Time of Flight (TOF)

Mit der Methode Time of Arrival (TOA), oftmals auch als Time of Flight (TOF) bezeichnet, wird die Distanz zwischen Sender und Empfänger nach Formel 3-1 durch Messen der Übertragungszeit eines Signals (z.B. Radiowellen) bei bekannter Übertragungsgeschwindigkeit (z.B. Lichtgeschwindigkeit bei Schallwellen) ermittelt.

Formel 3-1: Berechnung der Distanz zwischen Sender und Empfänger bei der TOA-Methode [9]

$$d_{\text{Sender-Empfänger}} = t_{\text{Übertragung}} \cdot v_{\text{Übertragung}}$$

Die Laufzeit der Übertragung lässt sich durch Subtrahieren der Empfangs- bzw. der Ankunftszeit von der Sendezeit errechnen. Dazu müssen die Uhren in beiden Objekten präzise aufeinander abgestimmt sein. Ein Synchronisationsfehler von einer Nanosekunde führt bei

Radiowellen zu einem Distanzfehler von 30 Zentimeter. Bei der Distanzbestimmung über die doppelte Strecke (engl. Round Trip Time - RTT) kann die Synchronisierung entfallen. [8, 9]

c) Time Difference of Arrival (TDOA)

Dieses Verfahren misst die Differenz der Ankunftszeiten von Signalen, die zwischen mehreren stationären und einer zu ortenden, mobilen Station übertragen werden. Das mobile Gerät kann dabei Sende- oder Empfangsfunktion wahrnehmen. TDOA (engl. Time Difference of Arrival) behebt den Nachteil der notwendigen, präzisen Synchronisation zwischen Sender und Empfänger. Allerdings müssen die sendenden Objekte ihre Signale synchron verschicken bzw. bei mehreren Empfangsstationen und einer mobilen Sendestation müssen die Empfängeruhren synchronisiert sein. Dies wird unter anderem bei GPS ausgenutzt, indem teure Synchronisationselektronik in den Satelliten verbaut wird und in den Empfangsgeräten (z.B. Smartphones) herkömmliche, kostengünstigere Verbraucherelektronik genutzt werden kann. Bei TDOA wird analog zu Formel 3-1 aus der Zeitdifferenz Δt die Streckendifferenz Δd bestimmt. [8, 9]

d) Angle of Arrival (AOA)

Angle of Arrival (AOA) ist eine Messtechnik, bei der die Richtung des Einfallswinkels eines Signals, das zwischen einem Sender und einem Empfänger übertragen wird, in Bezug auf ein gemeinsames Koordinatensystem erfasst wird. Deshalb ist auch der Begriff Direction of Arrival (DOA) gebräuchlich. Bei Radiowellen werden zur Winkelmessung direktionale, gerichtete Antennen oder sog. Antennen-Arrays verwendet. Beide können als Sende- oder Empfangsstation genutzt werden. Zur Messung ist Sichtkontakt (Kap. 3.1.1a)) zwischen beiden Stationen erforderlich. [8, 9]

3.1.3 Positionierungstechniken

a) Lateration / Trilateration / Multilateration

Die Begriffe Lateration, Trilateration und Multilateration beziehen sich allesamt auf die Positionsbestimmung aus Distanzmessungen. In der Literatur verweist der Ausdruck Trilateration häufig auf TOA (Kap. 3.1.2b)) und Multilateration auf TDOA (Kap. 3.1.2c)) als zu Grunde liegende Messtechnik. Allerdings verwenden einige Werke diese Nomenklatur auch, um auf die Anzahl der vorliegenden Messwerte bzw. ortsfesten Stationen („Tri“ = drei, „Multi“ = mehr als drei) hinzuweisen.

Formel 3-2: Kugelgleichung einer TOA-Messung (resultiert aus Abstand zwischen Sender und Empfänger) [13]

$$d_{i(\text{Sender-Empfänger})} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2}$$

Mit einer vorhandenen TOA-Messung kann die Position eines Objektes auf einer Kugel mit dem Radius nach Formel 3-1 bestimmt werden. Formel 3-2 zeigt die zugehörige Kugelgleichung. Der Punkt $S_i (X_i, Y_i, Z_i)$ bezeichnet die Position der bekannten Station, wohingegen x, y und z die unbekannten Koordinaten des zu ortenden Geräts beschreiben. Die Lateration verwendet nun Kugelschnitte (Abbildung 3-4), um dessen Standort exakt zu bestimmen. In der Ebene (2D) werden für die Lokalisierung mindestens drei Stationen bzw. Messwerte benötigt und im dreidimensionalen, räumlichen Bereich zumindest vier. Allerdings gibt es auch Verfahren, die durch Ausschlusskriterien (z.B. Objekt befindet sich in Bodennähe und nicht an der Decke) die notwendige Anzahl reduzieren.

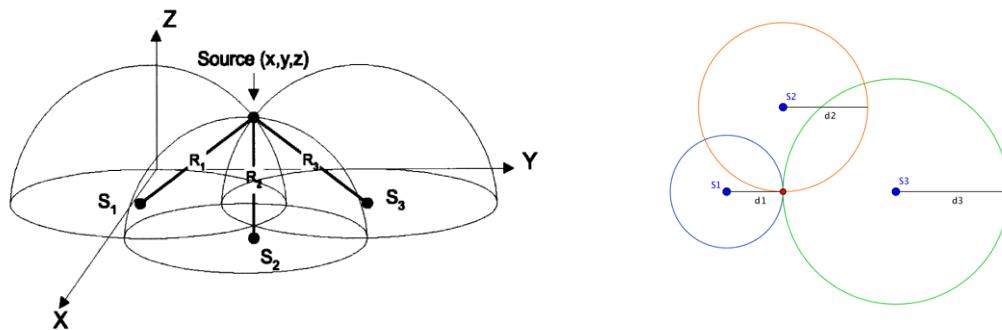
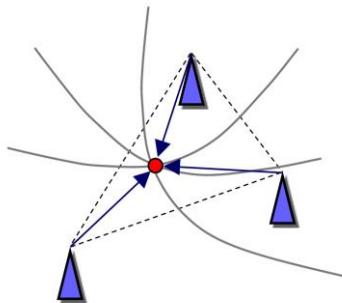


Abbildung 3-4: Trilateration (Kugelschnitte mit TOA-Messungen dreier bekannter Stationen), Links: räumliche Ansicht [13], Rechts: zweidimensionale Ansicht

Formel 3-3: Hyperbelgleichung einer TDOA-Messung (resultiert aus Abstandsdifferenz zwischen zwei bekannten und einer unbekannten Station) [13]

$$\Delta d_{ij} = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2 + (Z_j - z)^2}$$

Bei einer TDOA-Messung liegt die Position des zu ortenden Gerätes auf einer Hyperbel. Die Hyperbellinie nach Formel 3-3 beschreibt die Orte aller Punkte, deren Streckendifferenz (Δd_{ij}) denselben Wert aufweist. Die Punkte $S_i (X_i, Y_i, Z_i)$ und $S_j (X_j, Y_j, Z_j)$ sind bekannte Stationen und x, y und z die Koordinaten des Objekts, dessen Standort ermittelt wird. Die Lokalisierung erfolgt mittels Hyperbelschnitten durch die Technik der Lateration. Im dreidimensionalen Fall wird der Begriff Hyperboloid bzw. Hyperboloidschnitt verwendet. Im zweidimensionalen Bereich werden für die Positionsbestimmung wiederum mindestens drei Stationen bzw. Messwerte benötigt und im räumlichen Bereich vier. Diese Anzahl kann erneut durch verschiedene Ausschlusskriterien verringert werden, weshalb in der Literatur häufig widersprüchliche Informationen zu diesem Punkt zu finden sind. Abbildung 3-5 zeigt eine schematische Darstellung eines Hyperbelschnitts in der Ebene. [8, 13, 14, 15, 16]

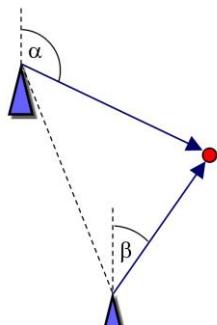


Streckendifferenzen (TDOA)
(Hyperbelschnitt)

Abbildung 3-5: Multilateration (Zweidimensionale Hyperbelschnitte durch TDOA-Messungen) [17]

b) Angulation / Triangulation

Triangulation bezeichnet die Positionsbestimmung eines Gegenstands auf der Grundlage von Einfallswinkelmessungen (Kap. 3.1.2d)). Die Vorsilbe „Tri“ bezieht sich in diesem Fall nicht auf die Anzahl der Basisstationen, wie bei der Lateration im vorausgehenden Abschnitt, sondern auf die Berechnung der Position durch trigonometrische Funktionen in Dreiecken. Im zweidimensionalen Fall sind mindestens zwei Basisstationen mit bekannter Position und Orientierung erforderlich, die den Winkel des Signalaustauschs mit einem Objekt in Bezug auf ein gemeinsames Koordinatensystem erfassen. Die Lokalisierung erfolgt daraufhin durch die Schnittmenge der sich ergebenden Linien (Abbildung 3-6). Mit zunehmender Anzahl der festen Stationen steigt die Genauigkeit des Ergebnisses. Für dreidimensionale Positionsbestimmungen ist bei diesem Verfahren keine zusätzliche Basis erforderlich. Lediglich die Sensorik zur Winkelerfassung und die Berechnungsvorschriften müssen angepasst werden, da sich zwei Geraden in der Regel nicht exakt schneiden, sondern windschief im Raum liegen. Für genauere Informationen zu den mathematischen Funktionen wird das Werk von Goswami [9] empfohlen. Triangulation wird zudem auch bei visuellen Stereometrieverfahren zur Gewinnung von dreidimensionalen Tiefeninformationen verwendet. [8, 9, 18]



Winkel (AOA)
(Triangulation)

Abbildung 3-6: Triangulation (Zweidimensionale Positionsbestimmung durch AOA-Messungen) [17]

c) Cell of Origin (COO)

Cell of Origin (dt. Ursprungszelle) ist ein vor allem im Mobilfunkbereich bekannt gewordenes Verfahren. Im mobilen Gerät wird festgestellt, von welchem Sender ein Signal ankommt bzw. welches die größte Signalstärke (engl. Receiving Signal Strength – RSS) aufweist. Durch die bekannte Lage der Sendestationen kann dadurch jede Position einer bestimmten Zelle zugeordnet werden. Die Genauigkeit hängt von der Größe und Form der Zellen ab. Diese wird durch die Art des Signals und die Anzahl der Sender bestimmt. Beispielsweise könnte ein System mit Ultraschalltags in jedem Raum, aufgrund der Beschränkung der Ultraschallausbreitung durch die umliegenden Wände, eindeutig bestimmen, in welchem Zimmer sich ein entsprechender Empfänger befindet. Diese Genauigkeit ist für die Indoornavigation unter Umständen ausreichend. [8, 16]

d) Fingerprinting (FP)

Fingerprinting ist eine Methode der Merkmalserkennung (engl. Pattern Matching) zur Lokalisierung. Sie beruht ursprünglich auf verschiedenen Ausbreitungsmodellen bzw. der Abnahme der Signalstärke (RSS) von Radiosignalen (z.B. WLAN) mit zunehmender Entfernung von der Quelle. Allerdings wird die Methode auch mit akustischen Tönen und visuellen Bildern eingesetzt. In einer Kalibrierungs- bzw. Trainingsphase (offline) werden Karten mit sog. Fingerabdrücken von zahlreichen Positionen erstellt. Die Daten können dabei durch empirisches Messen oder durch analytische Modelle gewonnen werden. In der Operationsphase (online) werden aktuelle Signale mit der vorab aufgenommenen Datenbank verglichen und der Wert mit der besten Übereinstimmung repräsentiert die Position des Objekts. Zusätzlich wird in vielen Verfahren die Karte laufend mit neuen Fingerabdrücken erweitert. [8, 9, 19]

3.1.4 Multisensorfusion (Kalman-Filter)

Das Kalman-Filter ist kein Filter im eigentlichen Sinne, sondern eher ein Algorithmus, der Zustände abschätzt. Die grundlegende Technik wurde bereits 1960 vom ungarischen Mathematiker Rudolf E. Kálmán entworfen und seitdem zahlreich weiterentwickelt. Dieser Schätzalgorithmus ist die Basis der beliebtesten Verfahren zur Multisensorfusion von relativen und absoluten Messwerten in Navigationssystemen, weshalb er hier exemplarisch vorgestellt wird. Es existieren auch diverse Abwandlungen für nichtlineare Modelle, wie beispielsweise das Erweiterte Kalman-Filter (engl. Extended Kalman Filter – EKF), bei denen zuvor eine Linearisierung durchgeführt werden muss.

Ein Algorithmus zur Zustandsvorhersage ermittelt die Werte von mehreren Parametern eines Systems in Echtzeit, die sich kontinuierlich verändern. Alle vorliegenden Sensorwerte werden fusioniert, kalibriert und dynamisch angepasst. Dabei verwendet ein Kalman-Filter alle Messwerte seit Start der Berechnung und nicht nur die aktuellsten. Es nutzt Wissen aus determinis-

tischen und statistischen Vorhersagen der Systemparameter und Messwerte und stellt durch Bayes'sche Prognosen eine optimale Schätzung bereit. Nach einer Initialisierungsphase arbeitet das Filter rekursiv, indem es die Schätzung als gewichtetes Mittel zwischen vorherigen und neuen Messwerten berechnet. Nichtrekursive Algorithmen würden alle Kalkulationen nur aufgrund der aktuellen Messungen tätigen und die bisherigen nicht mit einbeziehen. Um eine optimale Vorhersage treffen zu können, fließt zudem ein Fehlermodell über die Abweichungen und Korrelationen der Messdaten und Parameter in die Berechnung ein. Dies wird neben dem Schätzergebnis iterativ übertragen. Das Kalman-Filter kann somit als Kreislauf aus Messen, Vorhersagen und Korrigieren beschrieben werden, wie in Abbildung 3-7 zu sehen ist. Ein praxiserprobtes Beispiel ist erneut die Applikation Google Maps, bei der GPS u. a. mit der Technik der Inertialen Odometrie (Kap. 3.2.3) verknüpft wird. Für detaillierte Informationen zu den verschiedenen Filterarten und den genauen Berechnungsverfahren wird auf das Werk von Groves [20] verwiesen. Dort wird diese Thematik vertiefend beschrieben. [20]

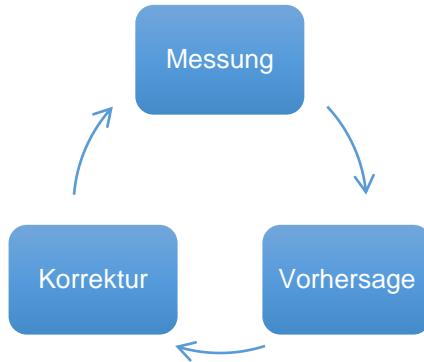


Abbildung 3-7: Das Kalman-Filter als iterativer Kreislauf

3.2 Technologien

3.2.1 Überblick

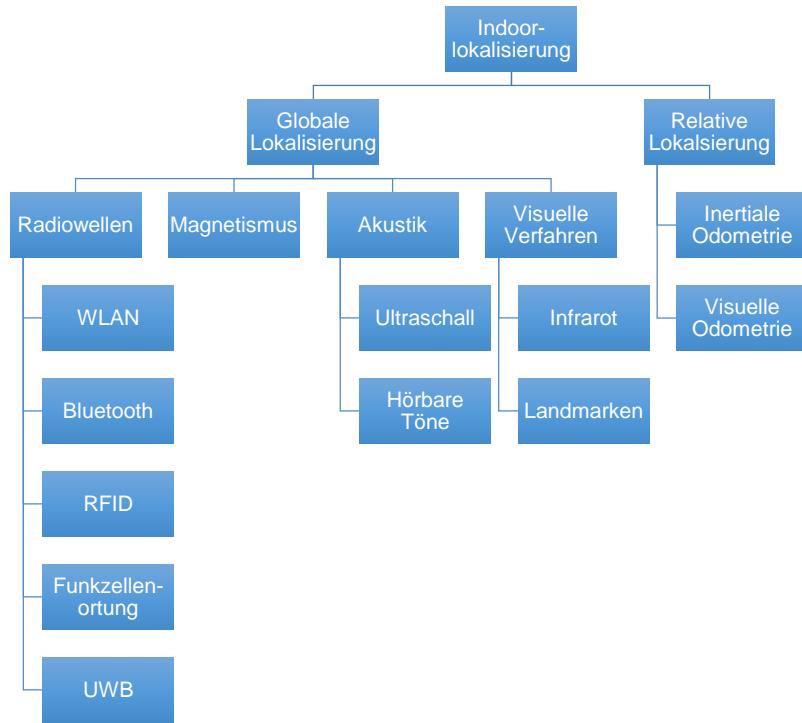


Abbildung 3-8: Überblick typischer Lokalisierungstechnologien der Indoornavigation

Als Ersatz für die Lokalisierung mittels GPS gibt es zahlreiche verschiedene Technologien, um die Position eines Objekts innerhalb eines Gebäudes zu bestimmen. Abbildung 3-8 stellt einen Überblick der weitverbreitetsten Verfahren dar. Dabei handelt es sich keinesfalls um eine vollständige Darstellung, da die Forschung stets neue, mehr oder weniger erfolgreiche, Lokalisierungstechnologien entwickelt. Bisher hat sich jedoch noch kein einheitlicher Standard geformt. Zudem wird in realen Systemen nur selten eine dieser Technologien verwendet, sondern häufig eine Kombination mehrerer Verfahren. Dies wird als sog. Hybrides System bezeichnet. Die Techniken können hinsichtlich globaler und relativer Positionsbestimmung aufgeteilt werden. Bei der Unterteilung der erstgenannten Gruppe stechen die Lokalisierungsverfahren auf Basis von Radiowellen besonders hervor. Dazu gehören WLAN, Bluetooth und RFID, die in Kapitel 3.2.2 näher betrachtet werden. Ferner gibt es die Funkzellenortung [21, 22], die oft in Kombination mit GPS eingesetzt wird, um dessen Genauigkeit zu erhöhen, und die Ultra-weitbandtechnologie (UWB) [23, 24]. Die weiteren globalen Lokalisierungstechnologien basieren auf Magnetismus [25, 26], Akustik [27] und visuellen Verfahren, zu denen Infrarot [28] und sog. Landmarken [29] gezählt werden. Dies sind beispielsweise an Wänden angebrachte Barcodes oder QR-Codes, die im eigentlichen Sinne keine Technik zur Positionsbestimmung darstellen. Allerdings werden sie in manchen Fällen verwendet, um die Installation

einer besonderen Technik zur Lokalisierung zu vermeiden, weshalb sie in die vorliegende Überblicksdarstellung aufgenommen werden. Der Benutzer einer solchen Navigationsanwendung wird durch das Gebäude geleitet, indem er an bestimmten Stellen mit einem mobilen Endgerät einen Code abscannt, der gut sichtbar, beispielsweise an Wänden, platziert ist, und dem System dadurch die aktuelle Position mitteilt. Für weitere Details zu den globalen Lokalisierungstechniken sind die genannten Referenzen zu empfehlen. Odometrieverfahren, bei der die Position relativ zu einem Startpunkt gemessen wird, lassen sich in inertiale und visuelle Systeme unterteilen. Die auf der Trägheit beruhende Inertiale Navigation wird in Kapitel 3.2.3 und die Visuelle Odometrie in Kapitel 3.2.4 behandelt. Tabelle 3-1 fasst die genannten Techniken in abstrakter Weise hinsichtlich ihrer Lokalisierungsgenauigkeit, der Reichweite eines einzelnen Knotens und typisch verwendeteter Messprinzipien zur Positionsbestimmung zusammen. Die angegebenen Intervalle stellen einen Mittelwert dar und beziehen sich auf die Mehrheit der Systeme in der jeweiligen Kategorie. Sicherlich gibt es Methoden, die diese Grenzen nach oben oder nach unten überschreiten. [30, 31]

Tabelle 3-1: Überblick typischer Lokalisierungstechnologien der Indoornavigation, Die (typische) Reichweite bezieht sich auf einen einzelnen Knoten (abgewandelt und ergänzt nach [32])

Technologie	Genauigkeit	Reichweite [m]	Typisches Messprinzipien
WLAN / WiFi	m	20-50	FP, COO, Lateration
Bluetooth	m	5-10	FP, COO, Lateration
RFID	dm – m	0,5-10	FP, COO, Lateration
Funkzellenortung	m – 100 m	10-1000 (Zellgröße)	FP, COO, Lateration
UWB	cm – m	1-50	FP, COO, Lateration
Inertiale Odometrie	1 %	10-100	Dead Reckoning
Visuelle Odometrie	1 %	1-10	Dead Reckoning, FP
Magnetismus	mm – cm	1-20	FP, COO, Lateration
Infrarot	cm – m	1-5	FP, COO, Lateration
Akustik	cm	2-10	FP, COO, Lateration
Landmarken	-	-	Einscannen mit Smartphone

3.2.2 Radiowellen

a) WLAN

Die weitverbreitete Nutzung von WLAN (engl. Wireless Local Area Network) in Häusern, Hotels, Flughäfen, Einkaufszentren und anderen kleinen und großen Gebäuden ist der Grund, weshalb diese Technologie zu den aktuell am häufigsten genutzten Techniken zur Positionsbestimmung in Innenräumen gehört. Die Verfügbarkeit von WLAN ist in den vergangenen Jahren zu einem alltäglichen Lebensstandard gereift.

Typischerweise besteht ein WLAN-System aus stationären Zugangspunkten (engl. Access Points – AP), die über ein Gebäude an bekannten, geeigneten Orten verteilt sind. Mobile Geräte kommunizieren über das Internet durch diese APs. Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) hat WLAN in der IEEE 802.11 Norm standardisiert. Dabei wurde dieser Standard hauptsächlich für einen schnellen, kabellosen Internetzugriff und nicht für den Zweck der Lokalisierung erschaffen. Die benötigte Hardwarestruktur zur Positionsbestimmung ist dabei allerdings bereits vorhanden, da ein Gebäude, in dem ein Indoornavigationssystem installiert werden soll, in der Regel bereits über eine WLAN-Infrastruktur verfügt. Im Vergleich zu GPS ist keine Line of Sight (Kap. 3.1.1a)) notwendig, da sich die WLAN-Signale durch Wände hindurch im Gebäude ausbreiten. Zur Verbesserung der Lokalisierung wird WLAN-Ortung bereits zusätzlich zu GPS in herkömmlichen Outdoornavigationssystemen (z.B. Google Maps) verwendet.

Algorithmen, die TOA- und TDOA-Messungen zur Ortung verwenden (Kap. 3.1.3a)), erfahren aufgrund des schwer berechenbaren Ausbreitungsmodells der Radiowellen innerhalb von Gebäuden und des Problems der Mehrwegeausbreitung (Kap. 3.1.1b)) durch geringe Genauigkeit der Positionsbestimmung alleinstehend keine besondere Beliebtheit. Außerdem werden im regulären IEEE-Standard keine Zeitstempel in den Signalen versendet. Beim Messen der Round Trip Time (RTT) müsste zudem die Verzögerung bei der Verarbeitung im Access Point berücksichtigt werden. Deshalb sind die in den vergangenen Jahren weitverbreitetsten Ansätze, bei der auf WLAN basierten Lokalisierungstechnologie, Cell of Origin (Kap. 3.1.3b)) und Fingerprinting (Kap. 3.1.3d)). Beim Betrachten der Receiving Signal Strength (RSS) müssen jedoch die Eigenschaften verschiedener Chips in unterschiedlichen WLAN-Zugangspunkten beachtet werden. Allerdings können die großen Zellen bei der COO-Technik eine bedeutende Ungenauigkeit hervorrufen, da WLAN eine durchschnittliche Reichweite von 20 bis 50 Metern in geschlossenen Räumen besitzt. In manchen Fällen kann diese sogar über 100 Meter betragen. Eine Einschränkung der Sendeleistung der Zugangspunkte (APs) und Installation weiterer Geräte würde die Fehlerrate verbessern, jedoch der eigentlichen Bestimmung der Access Points nach IEEE 802.11 entgegenwirken und höhere Kosten durch die zusätzlich benötigte Hardware verursachen.

Mit einem Smartphone lassen sich an den meisten Orten in Städten in der Regel zahlreiche verschiedene WLAN-Netzwerke bzw. Zugangspunkte finden. Auch wenn an der Universität der Bundeswehr München das „1X“-Netzwerk nahezu global über dem Campus ausgebaut ist, erfolgt eine Verbindung stets zu verschiedenen Access Points. Beim Wechseln der Position in Räumen oder bei der Bewegung durch Gebäude verändert sich die Verteilung der sichtbaren Zugangspunkte stetig. Dadurch kann die Technik des Fingerprinting eine sehr gute Performanz aufweisen. Karimi [33] vergleicht diverse Systeme, deren Fehlerdurchschnitt in der Genauigkeit der Lokalisierung bei zwei bis sechs Metern liegt. Dessen ungeachtet ist der Nachteil dieser Methode das Aufzeichnen zahlreicher Fingerabdrücke in der Trainingsphase. Zudem können Veränderungen in der Umgebung (z.B. Bewegung von Möbeln oder Umbauten) neue Aufzeichnungen notwendig machen oder die Positionsbestimmung negativ beeinflussen, wie beispielsweise offene bzw. geschlossene Türen oder sich bewegende Personen. [33, 34]

b) Bluetooth

Bluetooth ist eine kabellose Netzwerktechnologie, die hauptsächlich als Kommunikationsverbindung zwischen verschiedenen Geräten (z.B. Lautsprecher, Smartwatch, Smartphone) verwendet wird, da es nur in einem eingeschränkten Bereich verfügbar ist. Die typische Reichweite beträgt etwa fünf bis zehn Meter. Dies ist ein deutlicher Rückschritt im Vergleich zur WLAN-Technologie. Allerdings gibt es bei Bluetooth zahlreiche Gerätetassen, welche sich hinsichtlich ihrer Sendeleistung unterscheiden, weshalb auch Reichweiten von bis zu 100 Metern möglich sind.¹ Die Vorteile dieser Technologie sind die hohe Sicherheit, die niedrigen Kosten, der geringe Stromverbrauch und die Möglichkeit sehr kleine Geräte mit der erforderlichen Technik auszustatten. Es bedarf keiner sichtbaren Verbindung (Kap. 3.1.1a)), um Bluetoothsignale zu empfangen. Die durchschnittliche Fehlerrate bei der Lokalisierung beträgt nach Karimi [35] zwei bis sechs Meter - kein Fortschritt gegenüber WLAN - und es ist eine zusätzliche Hardwarestruktur in Form von sendenden Bluetooth-Chips erforderlich.

Häufig wird mit Hilfe eines analytischen Ausbreitungsmodells aus der empfangenen Signalstärke (RSS) der Abstand zwischen Sender und Empfänger geschätzt und die Genauigkeit dieser Messung angegeben. Negativ beeinflusst wird diese Technik durch Mehrwegeausbreitung (Kap. 3.1.1b)), bewegende Personen und physische Objekte (z.B. Wände), da Bluetoothsignale aufgrund der geringeren Sendeleistung bzw. Reichweite starke Abnahmen in der Signalstärke durch Hindernisse erfahren. Deshalb wird typischerweise zusätzlich zur einfachen Abstandsmessung Lateration (Kap. 3.1.3a)) und Fingerprinting (Kap. 3.1.3d)) verwendet. Außerdem ist die Methode der Cell of Origin (Kap. 3.1.3b)) sehr beliebt.

Die iBeacon-Technologie ist ein von Apple entwickeltes System zur Lokalisierung. Dabei werden zahlreiche Tags, sog. Beacons, über ein Gebäude verteilt. Diese senden sehr strom-

¹ Für nähere Informationen zu den verschiedenen Bluetooth-Standards wird auf die offizielle Webseite verwiesen: <https://www.bluetooth.com/> [Zugriff am: 15.05.2016]

sparende Bluetooth Low Energy Signale aus. Mit einer Knopfzellenbatterie beträgt die Verwendungszeit eines Beacons mindestens einen Monat. Es besteht zudem die Möglichkeit größere Batterien oder eine externe Stromversorgung einzusetzen. Abbildung 3-9 zeigt schematisch für die iBeacon-Technik die Abstandsmessung aus der Signalstärke (RSS) und die bereits angesprochenen Probleme.

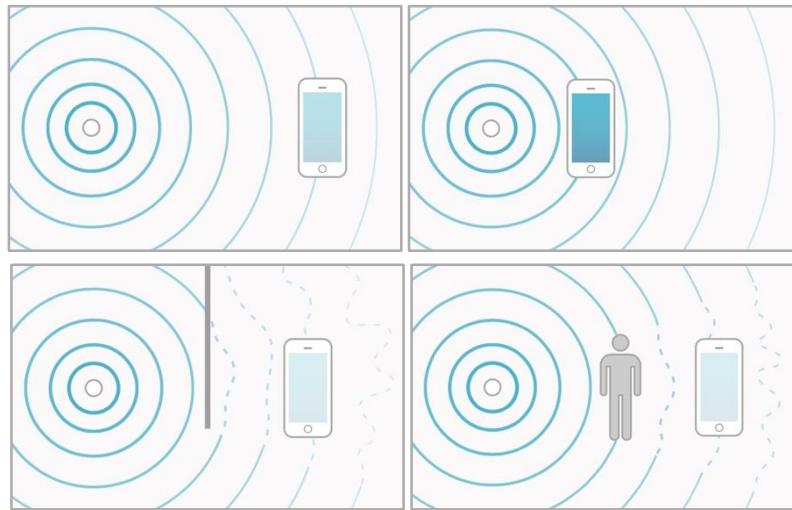


Abbildung 3-9: Links oben: Smartphone weit vom Beacon entfernt, verringerte Signalstärke und somit reduzierte Genauigkeit; Rechts oben: Smartphone näher am Beacon, weshalb Signalstärke und somit die Genauigkeit steigen; Links unten: Physische Objekte (z.B. Wände) reduzieren Signalstärke; Rechts unten: Menschen beeinflussen das Signal [37]

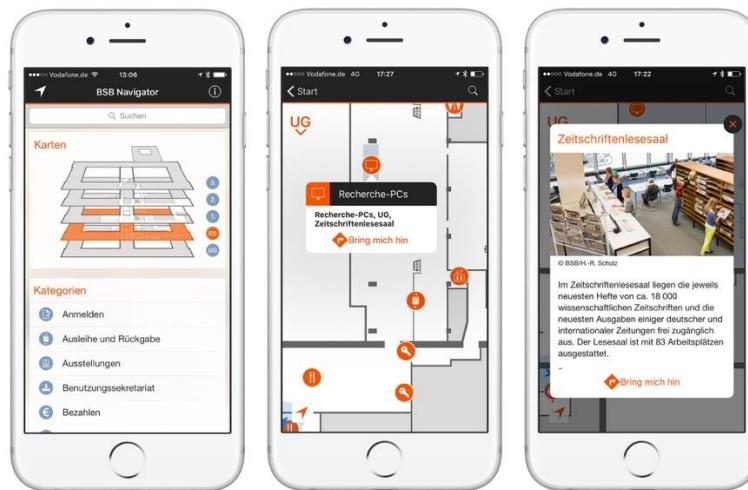


Abbildung 3-10: BSB Navigator – Indoor Navigationssystem für die Bayerische Staatsbibliothek [38]

Das Münchener Unternehmen „Bokowsky + Laymann GmbH“ entwarf ein Indoornavigationssystem für die Bayerische Staatsbibliothek. Die im März 2016 veröffentlichte Applikation „BSB Navigator“ (Abbildung 3-10) nutzt zur Lokalisierung 245 Bluetooth-Signalgeber, die sämtliche öffentlich zugänglichen Räume des Gebäudes abdecken. Diese sind im Abstand von etwa zehn bis fünfzehn Metern deckennah an den Wänden positioniert, sodass von jedem Standort eine sichtbare Verbindung (Line of Sight) zu zumindest einem Beacon besteht. In der Regel sind aber zwei bis drei Signalgeber sichtbar. Es wird eine Kombination der obig beschriebenen

Techniken verwendet, um den Standort des Nutzers zu ermitteln. Zur Realisierung des Fingerprinting wurde im Gebäude in der Entwicklungsphase alle paar Meter ein Fingerabdruck in eine Datenbank aufgenommen. In diesem sind die Sendestärke (RSS) und der Abstand zu den sichtbaren Beacons zu finden. Zur Identifikation der Blickrichtung werden Kompass und Gyroskop und zur Stockwerksbestimmung das Barometer des Smartphones genutzt (siehe auch Kap. 3.2.3 – Inertiale Odometrie). Es handelt sich somit um ein Hybrides System, da eine Fusionierung verschiedener Technologien die Position des Geräts bestimmt. Die Anwendung weist eine gute Performanz hinsichtlich der Genauigkeit der Lokalisierung auf, allerdings kommt es in abgeschotteten Bereichen mit nur einem Bluetooth-Signalgeber in der Line of Sight (LOS) zu größeren Diskrepanzen, die das Verfolgen einer berechneten Route bedeutend erschweren. [35, 36, 37, 38]

c) RFID

RFID (engl. Radio Frequency IDentification) hat in kürzester Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die Anwendungsgebiete sind vielfältig und reichen vom Ersatz für Barcodes, zum elektronischen Bezahlen (z.B. Apple Pay, Mensakarte) bis zur Sicherheitstechnik (z.B. Zugangskarte zum Gelände der Universität der Bundeswehr München, Diebstahlschutz im Einzelhandel). Auch in der Indoornavigation ist diese Technologie weitverbreitet. Prinzipiell wird zwischen passiven und aktiven RFID-Tags unterschieden, wobei die durchschnittliche Reichweite eines Chips dieser Technik zwischen einem halben und drei Metern liegt, eine erkennbare Abnahme gegenüber WLAN und Bluetooth. Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist der Frequenzbereich. Bei RFID gibt es Langwellen (LF), Kurzwellen (HF), Dezimeterwellen (UHF) und Mikrowellen (SHF). Im Vergleich zu den anderen, auf Radiowellen basierenden Lokalisierungsverfahren, wird bei RFID ebenfalls auf Lateration (Kap. 3.1.3a)), Cell of Origin (Kap. 3.1.3c)) und Fingerprinting (Kap. 3.1.3d)) gesetzt. Die Anzahl bzw. die Dichte der passiven oder aktiven RFID-Tags und deren Reichweite beschränkt dabei die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Die durchschnittliche Fehlerrate typischer Systeme reicht nach Mautz [39] vom Dezimeterbereich bis zu einer Abweichung von fünf Metern. Häufig wird RFID mit dem Begriff NFC (engl. Near Field Communication) verwechselt. Dabei handelt es sich jedoch nur um einen speziellen RFID-Standard mit passiven Transpondern, die eine Reichweite von wenigen Zentimetern aufweisen.

Ein passiver Tag enthält nur wenige Kilobyte an Daten, die von einem leistungsstärkeren Lesegerät (z.B. Smartphone), dem sog. Scanner, durch induktive oder kapazitive Kopplung ausgelesen werden können. Dabei wird ein Signal vom Leser am passiven Chip mit einer spezifischen Modulation (enthält typischerweise Seriennummer bzw. ID) reflektiert. Da die gesamte Energie hierbei vom Lesegerät kommt, brauchen passive RFID-Tags keinerlei Stromversorgung, weshalb derartige Chips auch sehr kostengünstig erhältlich und einfach zu warten sind. Weitere Vorteile sind die geringe Größe und eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber Störungen. Die Tags können für den Benutzer unauffällig in Teppiche oder Wände

integriert werden. Jedoch beschränkt sich die Reichweite der passiven RFID-Chips auf wenige Zentimeter bis max. zwei Meter. Aktive RFID-Tags benötigen eine externe Stromversorgung bzw. eine Batterie und können selbst Signale aussenden, die von Lesegeräten erfasst werden. Dabei sind im Mikrowellenbereich auch Reichweiten von über zehn Metern möglich.

Zusammenfassend ist RFID die kostengünstigste auf Radiowellen basierende Technologie zur Lokalisierung mit einer für die Indoornavigation ausreichenden Genauigkeit. Allerdings wird, wie bei Bluetooth, zusätzliche Hardware benötigt. Einerseits ist eine im Gebäude verteilte RFID-Tagstruktur erforderlich und andererseits muss das Smartphone bzw. das Lesegerät diese Technik ebenfalls beherrschen. Nachdem Samsung schon länger auf die NFC-Technologie in ihren Android-Smartphones setzt, gibt es diese Technik nun auch seit dem iPhone 6 in den Geräten von Apple. Allerdings kann beispielsweise der Apple Pay Dienst in Deutschland zum Verfassungszeitpunkt dieser Ausarbeitung noch nicht verwendet werden. [39, 40]

3.2.3 Inertiale Odometrie

Das Prinzip der Inertialen Odometrie wird in der Literatur häufig mit verschiedenen Begriffen bezeichnet. Neben dem Ausdruck Trägheitsnavigationssystem bzw. Inertiales Navigationsystem (engl. Inertial Navigation System – INS), die als Synonym verwendet werden können, wird diese Technik oftmals mit Dead Reckoning (Kap. 3.1.2a)) oder Inertiale Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit – IMU) referenziert. Diese beiden Begriffe stellen jedoch ein Messprinzip bzw. eine Messkomponente der übergeordneten Technologie der Inertialen Odometrie dar, die im Folgenden erläutert wird.

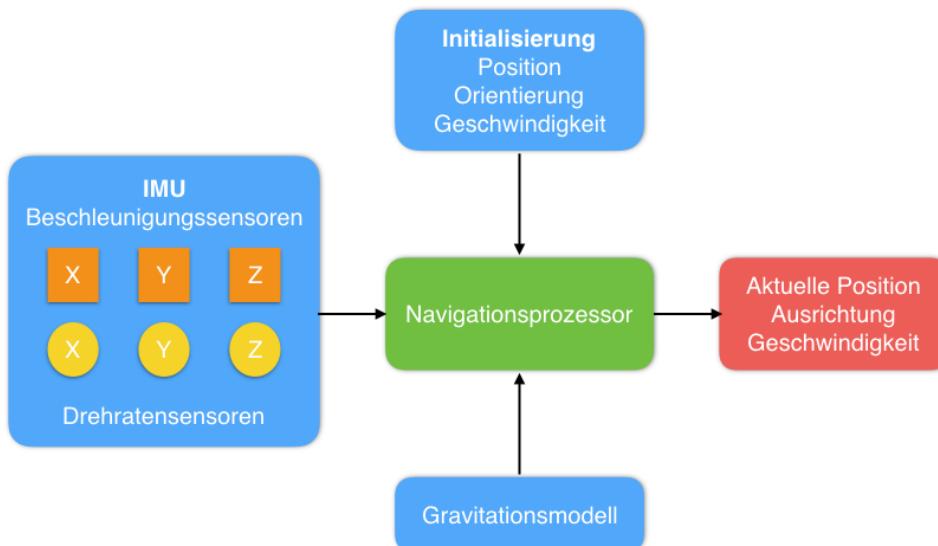


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung eines Inertialen Navigationssystems [41]

Ein Trägheitsnavigationssystem (INS) eines typischen mobilen Endgeräts besteht aus einer Inertialen Messeinheit (IMU) und einem sog. Navigationsprozessor, wobei der Begriff IMU

auch für die Kombination beider Komponenten gebräuchlich ist, und bezeichnet ein System, das auf der Dead Reckoning Messtechnik beruht. Zur Erfassung aller sechs kinematischen Freiheitsgrade besteht ein Inertiales Navigationssystem typischerweise aus jeweils drei zueinander orthogonal ausgerichteten Beschleunigungssensoren (Accelerometer), die die translatorische Bewegung messen, und drei Drehratensensoren oder Kreiselinstrumente (Gyroskope), welche die Rotation hinsichtlich aller drei Achsen aufnehmen. Diese Bauteile sind fest mit dem Gerät verbunden, sodass alle Messwerte im lokalen Koordinatensystem des Systems vorliegen. Durch numerische Integration der Beschleunigungs- und Drehraten über die Zeit erhält man zunächst die Relativgeschwindigkeit und anschließend eine geschätzte Information über die relative Position und Orientierung des mobilen Endgerätes. Dies geschieht im sog. Navigationsprozessor. Da die Inertialsensorik nicht nur die reine Gerätbewegung misst, fließt zudem ein Gravitationsmodell in die Berechnung mit ein, das die Messungen noch um Gravitations-, Zentrifugal- und Coriolisbeschleunigung korrigiert. Des Weiteren ist es unabdingbar zu Beginn eine Initialisierung mit absoluten Werten für die Position, Ausrichtung und Geschwindigkeit vorzunehmen. Um die aktuelle Lage und den Standort im globalen Koordinatensystem zu erhalten, werden die relativen auf die absoluten Messdaten addiert. Abbildung 3-11 zeigt eine schematische Darstellung eines Inertialen Navigationssystems. Bei vielen Trägheitsnavigationssystemen, speziell bei Tablets und Smartphones, werden zum Erhöhen der Genauigkeit zusätzlich Barometer für Höheninformationen und wiederum orthogonal angeordnete Magnetfeldsensoren (Magnetometer) verbaut, die die geschätzte Bewegungsrichtung verbessern.

In den Anfängen der Inertialnavigation wurden mechanische Sensoren für die Messungen verwendet. Heute dominieren sog. MEMS-Sensoren (engl. Micro-Electro-Mechanical System), die sehr klein, kostengünstig und robust gegenüber Störungen produziert werden. Durch die fortschreitende Miniaturisierung ist es inzwischen möglich, alle Einheiten einer IMU in solch ein Mikrosystem zu integrieren und platzsparend in ein mobiles Endgerät zu verbauen. Die MEMS-Technik hat ihren Nachteil allerdings in der Genauigkeit des Inertialsystems. Deshalb sind beispielsweise in militärischen und zivilen Flugzeugen hochwertigere Systeme zu deutlich höheren Preisen zu finden. Preiswerte MEMS-Sensoren weisen erhebliche Messfehler (z.B. Bias, Bias-Drift, Skalenfaktorfehler, Nichtorthogonalität der Skalenachsen, etc.) auf. Diese führen mit zunehmender Laufzeit zu erheblich anwachsenden Fehlern in der relativen Position und Orientierung und letztendlich durch Addition auf absolute Werte zu großen Abweichungen in der globalen Lokalisierung. Durch die mehrfache Integration der Beschleunigungen und Drehraten über die Zeit im Navigationsprozessor fließen die Fehler letztendlich quadratisch bzw. kubisch in die Berechnung ein. Deshalb werden die Sensoren durch mathematisch modellierte, reproduzierbare Fehlermodelle zur Laufzeit stetig kalibriert und dazu zyklisch mit externen, absoluten Referenzmessungen (z.B. auf Radiowellen basierte Lokalisierungs-technologie) kombiniert. Dabei bestimmen Multisensoralgorithmen, typischerweise ein Kalman-Filter (Kap. 3.1.4), eine Vorhersage bzw. einen Schätzwert der aktuellen Position und Ausrichtung aus allen vorliegenden Daten. Der Nachteil eines jeden Sensors kann durch einen

anderen ausgeglichen werden. Es entsteht eine integrierte Navigationslösung. Dieses Prinzip ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

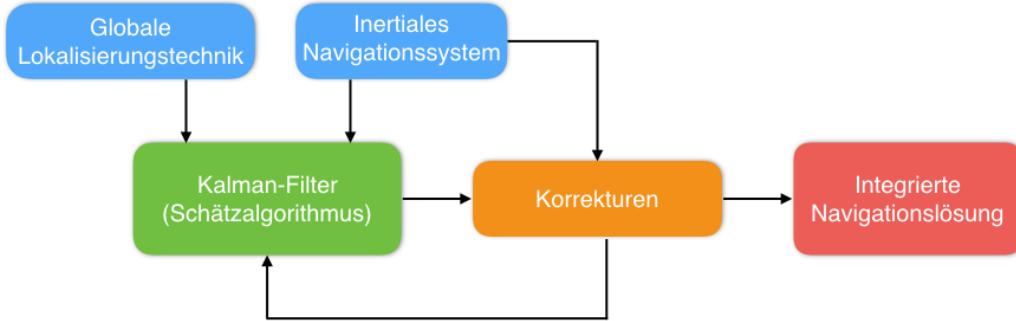


Abbildung 3-12: Integration von Inertialer Odometrie mit einer globalen Lokalisierungstechnologie durch Multisensorfusion mit einem Kalman-Filter in einem sog. Hybriden System (abgewandelt nach [42])

Die Vorteile der Technologie der Inertialen Odometrie sind eine kontinuierlich hohe Updaterate, die Bereitstellung von Position, Orientierung und Geschwindigkeit und eine Robustheit gegenüber Störungen. Ein derartiges System kann eigenständig ablaufen und benötigt keine externe Infrastruktur. Um die daraus resultierende, streng monoton steigende Fehlerrate zu minimieren, sind allerdings zyklisch globale Messdaten erforderlich, deren Frequenz deutlich geringer sein kann. Außerdem ist zu Beginn eine Initialisierung von Nöten. Die Genauigkeit hängt von der Art der verwendeten Sensoren, dem Algorithmus der Sensorfusion und der Fehlerlosigkeit und Updatefrequenz der absoluten Messwerte ab. Je kürzer die Integrationszeit, desto exakter ist das Ergebnis. Da ein Inertiales Navigationssystem ohne Kombination mit anderen Lokalisierungstechniken ausschließlich relative Werte für Position und Ausrichtung liefert, wird die Genauigkeit anhand des Verhältnisses von berechneter Position zu realer Position angegeben. Durchschnittlich liegt sie bei etwa einem Prozent. Durch die Verbindung mit anderen Technologien in einem Hybriden System (Abbildung 3-12) können Abweichungen im Zentimeter- bis Millimeterbereich erreicht werden. Die Inertiale Odometrie ist aus der Indoornavigation somit nicht mehr wegzudenken. [43, 44, 45]

3.2.4 Visuelle Odometrie

Bildbasierte Navigation (engl. Image-Based Navigation) ist zu einer der dominierenden Techniken zur Positionsbestimmung geworden und wird zukünftig eine große Rolle im Forschungsgebiet der Indoornavigation einnehmen. Die Verbesserung und Miniaturisierung von Kamerasystemen und effizientere Bildverarbeitungsalgorithmen sind, neben der Zunahme von Datenraten und Rechenleistung, für den Erfolg von optischen Methoden verantwortlich. Außerdem ist bei derartigen Verfahren in der Regel keine zusätzliche Hardwarestruktur im Gebäude erforderlich. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf die Navigation mit Kamera-

systemen von mobilen Endgeräten gelegt. Dies wird in dieser Arbeit als Visuelle Odometrie bezeichnet, da die vorgestellte Lokalisierungstechnologie auf dem Prinzip des Dead Reckoning (Kap. 3.1.2a)) beruht. Es gibt jedoch auch zahlreiche weitere kamerabasierte Verfahren. Hierfür sind die Werke von Mautz [47] und Groves [48] zu empfehlen. Oftmals wird in der Literatur auch mit dem aus der Robotik stammenden Begriff Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) auf diese Technologie verwiesen.



Abbildung 3-13: Beispiel einer Bildersequenz (aufgenommen mit einem iPhone 6S)

Das Verfahren der Visuellen Odometrie basiert auf sequentiell aufgenommenen Bilderreihen (Abbildung 3-13) entlang einer zurückgelegten Strecke. Während sich der Benutzer beispielsweise mit einem Smartphone durch das Gebäude bewegt, erfasst die integrierte Kamera die Umgebung. Dabei wird die aktuelle Aufnahme mit einer bekannten Datenbank verglichen, in der alle zuvor aufgezeichneten Bilder enthalten sind, und die Differenz der Aufnahmepositionen wird berechnet. Durch Wiedererkennen von bereits durchlaufenen Gebieten kann somit die relative Position und Orientierung des Geräts bestimmt werden. Hierbei wird nicht das gesamte Bild betrachtet und gespeichert, sondern besondere Merkmale aus diesem extrahiert. Diese lassen sich oftmals an Ecken und Kanten von Objekten finden. Ein Bildverarbeitungs- bzw. Matching-Algorithmus sucht nach Übereinstimmungen mit bekannten Besonderheiten. Eine hierfür häufig verwendete Technik ist die sog. skaleninvariante Merkmalstransformation (engl. Scale-Invariant Feature Transform - SIFT), die im Werk von Goswami [46] ausführlich erläutert wird. Abbildung 3-14 zeigt eine allgemeine Darstellung des Prinzips der Visuellen Odometrie. Oftmals reicht das Kamerasystem zur Lokalisierung nicht aus, sodass zusätzliche Informationen durch eine externe Referenz benötigt werden, um Lücken zwischen einzelnen Berechnungen zu schließen, den bei Odometrieverfahren mit der Zeit wachsenden Fehler zu kontrollieren und globale Positionsangaben bereitzustellen. Hierfür gibt es zahlreiche verschiedene Methoden, die in den genannten Quellen ausführlich erläutert werden. Ein derartig Hybrides System ist beispielsweise Googles Project Tango, das in Kapitel 6 vorgestellt wird.

Die Mehrheit der Applikationen, die solch ein System verwenden, besitzen eine Genauigkeit im Millimeterbereich. Wie bei der Inertialen wird bei der Visuellen Odometrie alleinstehend ausschließlich die relative Position bestimmt, weshalb die durchschnittliche Abweichung häufig auch mit etwa einem Prozent beziffert wird. Außerdem wird neben dem mobilen End-

gerät keine spezielle Hardwarearchitektur innerhalb eines Gebäudes benötigt, um dieses Verfahren für die Indoornavigation nutzen zu können. Allerdings wird zum Erkennen von Übereinstimmungen in Bildern eine hohe Rechenleistung benötigt und das Verwalten der Datenbank erfordert einen enormen Speicherplatzbedarf. In den Anfängen dieser Technologie war oft zusätzliche, mobilitätseinschränkende Ausrüstung notwendig, da in einem mobilen Endgerät nicht die erforderliche Hardware verbaut werden konnte. Inzwischen ist aber nicht nur diese Herausforderung erfolgreich bewältigt, sondern die Geräte können die Technik mittlerweile in Echtzeit zur Verfügung stellen. Ferner beeinflussen u. a. Veränderungen der Umgebung (z.B. bewegende Personen, neue Möbel), Tageszeiten und gleichartige Gänge oder Gebäude die Performanz des Bildverarbeitungsalgorithmus und wirken sich negativ auf die Dauer und Genauigkeit der Positionsbestimmung aus. [46, 47, 48]

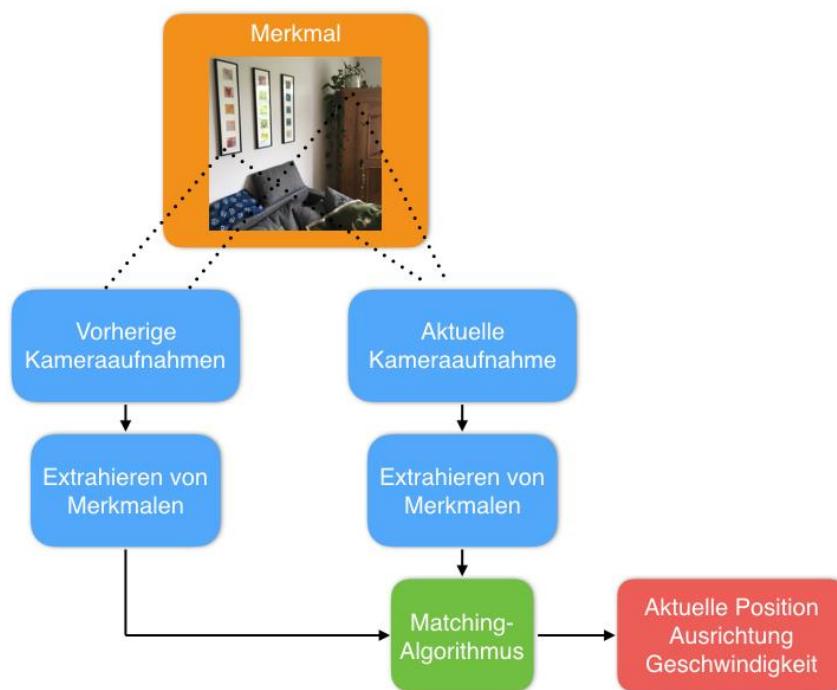


Abbildung 3-14: Wiedererkennen von Merkmalen durch Matching-Algorithmus (abgewandelt nach [49])

4 Datenbank

Nachdem im vorherigen Kapitel diverse Lokalisierungstechniken beschrieben wurden, behandelt dieser Abschnitt die Datenbank bzw. das zugrundeliegende Netzwerk eines Indoornavigationssystems. Dieses soll zum einen optisches Kartenmaterial für die Benutzervisualisierung liefern und zum anderen der Routingkomponente eine graphische Repräsentation des Gebäudeinetzwerks zur Berechnung von Wegen bereitstellen (Abbildung 2-2). Während zahlreiche Organisationen (z.B. Google, OpenStreetMap) Daten für Outdoornavigationssysteme sammeln, hat sich bisher keine Vereinigung zum einheitlichen, standardisierten Erfassen von Innenraumumgebungen profiliert. Sicherlich spielen dabei datenschutzrechtliche Bedenken bei der Veröffentlichung des Innenbereichs eines Gebäudes auch eine große Rolle. Zunächst werden in diesem Kapitel verschiedene Kartografietechniken und graphische Repräsentationen (Kap. 4.1) erläutert und anschließend einige existierende Datenformate (Kap. 4.2) beschrieben, wobei sich bisher kein Standard durchgesetzt hat. Abschließend wird auf die Methode des sog. Map Matching (Kap. 4.3) eingegangen, das wesentliche Verfahren, um Positionsinformationen mit Kartenmaterial zu verbinden.

4.1 Kartografie

Als Kartografie wird in dieser Arbeit der Herstellungsprozess von digitalen Gebäudekarten zur direkten Verwendung in einem Navigationssystem bezeichnet. Derartige Karten sind in der Regel nicht vorhanden und müssen mit spezieller Hard- und Software erstellt werden. Sie stellen einen weiteren kritischen und kostspieligen Teil eines Indoornavigationssystems dar und beeinflussen direkt dessen Qualität. Deshalb ist es wichtig, ein einheitliches Format zum Modellieren, Speichern und Austauschen von Innenraumkarten zu finden, um Insellösungen abzuschaffen, einen Standard zu formen und so die Kooperation verschiedener Programme zu ermöglichen. Der Benutzer möchte mit einer Applikation durch viele Gebäude geleitet werden und nicht stets die Anwendung wechseln müssen. Eine Gebäudekarte lässt sich abstrakt in Räume und Gänge unterteilen, die durch Wände voneinander abgegrenzt sind und Türen als horizontale bzw. Treppen und Aufzüge als vertikale Verbindungen besitzen. Die Daten enthalten zudem Längen- und Höhenangaben sowie die Namen der Objekte. Die Positionen der Elemente werden relativ zu sog. Fixpunkten angegeben. An diesen Zugangspunkten findet in einem universalen Navigationssystem eine Umrechnung zwischen lokalen und globalen Koordinaten statt, um einen nahtlosen Übergang zwischen Innen- und Außenbereichen zu gewährleisten. Außerdem erfolgt ein Austausch zwischen den verschiedenen Datenmodellen. Häufig wird dabei von CAD und GIS Integration gesprochen.

Im Zusammenhang mit Datenmodellen bzw. Kartierungstechniken von Indoornavigationssystemen sind in der Literatur zumeist die Begriffe GIS, BIM und CAD zu finden. Allerdings handelt es sich bei keinem dieser Ausdrücke um ein, ohne manuelle Anpassungen, verwendbares Datenformat zum Modellieren, Speichern und Austauschen von Gebäudeinformationen. Nachfolgend werden die Begriffe in den Kontext dieser Ausarbeitung eingeordnet. GIS (engl. Geographic Information System) steht für Geoinformationssystem und wird in Outdoornavigationssystemen als räumliches Datenmodell für Straßen- und Gehwegsegmente verwendet. In Kombination mit GPS-Lokalisierungsinformationen stehen Routingfunktionen zur Verfügung. Rechnerunterstütztes Konstruieren bzw. CAD (engl. Computer Aided Design) ist ein allgemein bekannter Begriff für das Erstellen von zwei- oder dreidimensionalen Modellen auf Computerbasis. Mit CAD-Programmen (z.B. AutoCAD, SketchUp, ArchiCAD) können Abbildungen von Innenraumumgebungen erzeugt werden. Somit steht für jedes Stockwerk ein Layout in gewünschter Dimension und definiertem Detailgrad zur Verfügung. BIM (engl. Building Information Modeling) ist ein Verfahren der Gebäudedatenmodellierung aus der Bauindustrie und kombiniert CAD-Modelle mit zusätzlichen Informationen über Geometrie, Topologie und Eigenschaften von Innenbereichen. Es können auch semantische Verknüpfungen bzw. Beziehungen zwischen einzelnen Objekten modelliert werden. Datenformate der Indoornavigation (Kap. 4.2) beruhen zumeist auf der BIM-Methodik. Kapitel 4.1.1 erläutert diverse Techniken zur Kartenerzeugung, gefolgt von einer genaueren Betrachtung der graphischen Repräsentationen der Karten (Kap. 4.1.2), die Routingfunktionen bereitstellen. [18, 50, 51, 52]

4.1.1 Kartierungstechniken

Die Kartierung eines Gebäudes umfasst das Sammeln von Informationen zur Beschreibung des Layouts und die Konvertierung der Daten in eine Form, die von anderen Komponenten des Systems (Abbildung 2-2) genutzt werden können. In der Indoornavigation benötigt die Routingkomponente topologische und semantische Angaben über die Zusammenhänge zwischen den Gebäudeteilen. Außerdem bedarf es für die Kartensvisualisierung einer zwei- oder dreidimensionalen, benutzerfreundlichen Darstellung. Die korrekte Erfassung und Darstellung des Innenbereichs beeinflusst die Genauigkeit der Navigationsanwendung direkt. Elektronische, digitale Karten haben Pläne in Papierform nahezu vollständig verdrängt. Neben der einfachen Visualisierung von Gebäuden werden meist Optionen zum Zoomen und Verschieben der Karte und zum Auswählen und Suchen bestimmter Orte angeboten. Weitere Funktionen sind die Lokalisierung des aktuellen Standorts und die Navigation zu gewünschten Zielpositionen. In Indoornavigationssystemen sind die Möglichkeiten dabei meist auf ein bestimmtes Gebäude beschränkt, da es bisher noch keine globale Lösung für die Navigation innerhalb von geschlossenen Räumen gibt. Tabelle 4-1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Kartenerzeugung. Jede gegenwärtige Indoornavigationslösung verwendet

eine individuelle Kombination verschiedener Kartierungstechniken, deren Vor- und Nachteile im Folgenden erläutert werden.

Tabelle 4-1: Merkmale und Varianten der Kartierungstechniken für die Indoornavigation

Merkmal	Varianten
<i>Dimension</i>	<ul style="list-style-type: none"> • 2D (2,5D) • 3D
<i>Datenbasis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Grundriss (2D) • CAD-Modell (2D, 3D) • Wahrscheinlichkeitsmodell (SLAM)
<i>Zeitpunkt</i>	<ul style="list-style-type: none"> • vorher • zur Laufzeit (SLAM)

Die Kartendimension stellt das erste Unterscheidungsmerkmal dar. Zweidimensionale Karten sind aus der Outdoornavigation hinreichend bekannt und bei Nutzern sehr beliebt. Für die Navigation in Innenbereichen sind 2D-Pläne für jedes Stockwerk notwendig. Hierfür ist der Begriff 2,5D geläufig. Durch Herauszoomen kann zudem die globale Lage und Orientierung des Gebäudes betrachtet werden, nachdem diese durch Ziehen der zweidimensionalen Karte an die richtige Position in einem globalen Navigationssystem (z.B. Google Maps) fixiert wurde. Die aktuelle Position des Benutzers wird typischerweise durch einen Punkt visualisiert und Wegbeschreibungen können somit in Form von verbundenen Liniensegmenten dargestellt werden. Dreidimensionale Innenraummodelle hingegen präsentieren dem Nutzer während der Navigation mehr Informationen über die Umgebung und ermöglichen eine bessere räumliche Orientierung. Die globale Position bleibt verborgen. Der gegenwärtige Standort und die Lage des Navigationsgeräts werden in Form einer 3D-Ansicht demonstriert. Oftmals weisen Pfeile den Weg, nachdem eine Route berechnet wurde. Einige Indoornavigationssysteme erlauben ein dynamisches Umschalten zwischen zwei- und dreidimensionaler Kartenansicht.

Als Datenbasis der Kartografie dienen zum einen 2D-Grundrisse oder Satellitenaufnahmen, aus denen Navigationskarten mit manuellen Anpassungen extrahiert werden können. Pläne dieser Art sind für viele Gebäude verfügbar. Zum anderen bieten CAD-Modelle drei- und zweidimensionale Karteninformationen an. Allerdings müssen derartige Daten häufig aufwendig durch entsprechende Soft- und Hardware konstruiert werden, da CAD-Modellierungen bzw. Vermessungen von Gebäuden typischerweise nicht vorhanden sind. Durch steigende Automatisierung in der Gebäudeerfassung und Erkennung von Objekten werden diese Verfahren zunehmend vereinfacht. Der aktuelle Stand der Technik erfordert dennoch zahlreiche manuelle Eingriffe. Geometrische Informationen können beispielsweise automatisch generiert werden, aber die semantische Verknüpfung von Treppen und Aufzügen muss stets per Software festgelegt werden. In der Regel geschieht die Kartierung bei diesen beiden Techniken vor dem

Start des Navigationssystems. Zudem kann zwischen Karten unterschieden werden, die Hindernisse und Möbel beinhalten und solchen, die diese ignorieren.

Einen anderen Ansatz verfolgt die dynamische Kartenerzeugung zur Laufzeit. Diese Technik der Simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung wird als SLAM (engl. Simultaneous Localization and Mapping) bezeichnet und hat ihren Ursprung in der Robotik, wo sich Roboter-systeme in unbekannten Umgebungen zurechtfinden. Es gibt aber bereits viele Versuche für die Nutzung in der Indoornavigation. Durch Auswerten von Sensordaten mit einem Wahrscheinlichkeitsmodell wird während der Navigation durch ein Gebäude, ohne vorheriges Wissen über die Umgebung, eine Karte erzeugt. Menschliche Bewegungsmodelle und Bewegungsschätzungen fließen in die Berechnung mit ein. Es gibt sogar Modellierungen für betrunkenen Personen. Als Ergebnis sollte letztendlich eine Karte mit alle begehbarer Bereichen und Hindernissen entstehen. Für eine vollständige Kartierung besteht die Notwendigkeit, das Gebäude mit einem oder mehreren Geräten zumindest einmal zu durchlaufen. Durch Kombination von SLAM mit anderen Verfahren und Verknüpfung mit bekannten Positionen von Objekten (z.B. WLAN-APs) kann diese Methode andere Varianten mit dynamischen Informationen über veränderte Umgebungen (z.B. neues Hindernis) unterstützen. Bereits vorhandene zwei- oder dreidimensionale Karten liefern von Anfang an gute Ergebnisse, während bei der Verwendung von SLAM eine Initialisierungsphase notwendig ist, bis genügend Informationen über die Umgebung vorhanden sind. [18, 51, 52]

4.1.2 Graphische Repräsentation

Um mit einem Algorithmus den bestmöglichen Weg zwischen zwei Positionen zu berechnen und Routingfunktionen bereitzustellen, muss das Layout bzw. die Kartendarstellung eines Innenbereichs zu einer Graphstruktur mit Knoten und Kanten konvertiert werden, da die meisten Routingalgorithmen auf derartigen Modellierungen beruhen. Hierfür gibt es verschiedene Verfahren und Modelle. Räume bzw. Gänge werden typischerweise als Knoten modelliert und sind mittels Türen, Aufzügen und Treppen miteinander verbunden. Eine derartige Verbindung bzw. Kante repräsentiert einen Weg, den eine Person direkt zwischen zwei Knoten betreten kann. In einigen graphischen Strukturen besteht zudem die Möglichkeit große Knoten, wie beispielsweise einen langen und verwinkelten Korridor in einem Bürokomplex, in kleinere Teilstücke zu zerlegen, sodass bei jeder Orientierungsänderung beim Verfolgen eines Weges auch ein Knoten passiert wird. Dies steigert die Effizienz des Routingalgorithmus. Die Wahl einer Abzweigung bzw. einer Kante ist mit Kosten verbunden. Oft werden diese in Navigationssystemen anhand von Distanzen oder Zeiten angegeben. Es gibt aber auch Verfahren, in denen beispielsweise nur die Anzahl der zu überwindenden Türen bzw. Treppen gezählt werden. [18, 52]

4.2 Datenformate

Um Informationen über die Innenbereiche von Gebäuden speichern und austauschen zu können, bedarf es eines einheitlichen, strukturierten Datenformates, das sämtliche, von einem Indoornavigationssystem benötigte, Daten beinhaltet. Dadurch würde der Transfer von Gebäudedaten und die Zusammenarbeit verschiedener Programme stark vereinfacht werden. Die Mehrzahl der bestehenden Formate wurde nicht für die Indoornavigation entworfen, weshalb oftmals nur geometrische und logische Informationen über ein Gebäude und dessen Elemente gespeichert werden und aufgrund von fehlendem topologischem Wissen keine Routingfunktionen angeboten werden können. Die Topologie von Innenbereichen wird häufig in Form eines Graphen mit Räumen als Knoten und Türen, Treppen und Aufzügen als Kanten modelliert. Einige Datenformate können sogar die Öffnungsrichtung einer Tür beschreiben. Es gibt auch Ansätze ohne konkrete Geometrie, in denen Längenangaben bzw. Distanzen durch die Anzahl der zu überwindenden Türen von einer Start- zu einer Zielposition wiedergegeben werden. Bisher gibt es kein Standardformat, sondern lediglich eine Vielzahl an unstrukturierten Halblösungen, wobei im Folgenden die in der Literatur am häufigsten beschriebenen Entwürfe vorgestellt werden. Der Schwerpunkt dieses Teilkapitels liegt auf IndoorGML (Kap. 4.2.4), da dieses Format eine der vielversprechendsten Lösungen darstellt. Zukünftige Konzepte sind bislang nicht absehbar. In den nächsten Jahren besteht allerdings die unbedingte Notwendigkeit in der Forschung und Industrie zur Standardisierung, um die zunehmende Entwicklung von Insellösungen für die Indoornavigation zu stoppen und verschiedene Systeme bzw. Kartenmaterialien miteinander kompatibel zu machen. [52]

4.2.1 OpenStreetMap (OSM)

Neben den kommerziellen Drittanbietern zur Sammlung von Geodaten hat sich die offene Kartografiegemeinschaft OpenStreetMap (OSM) als kostenlose Alternative etabliert, wobei deren Datenbank mittlerweile mehr Gebäude als Straßen besitzt. Der Schritt in Richtung Indoornavigation ist also naheliegend. Der Vorteil bestünde darin, dass sobald eine Innenarchitektur mit einem in OSM benutzbaren Datenformat modelliert werden würde, alle verfügbaren Funktionen des Netzwerkes zur Verfügung stehen. Mit einer entsprechenden Lokalisierungstechnologie für den Innenbereich wären Routingfunktionen verfügbar und somit ein betriebsbereites Indoornavigationssystem einfach realisierbar. Bei der Recherche nach Datenformaten zur Beschreibung von Innenbereichen in OSM wird in der Literatur häufig IndoorOSM² (engl. Indoor OpenStreetMap) erwähnt. Dies ist ein erster Versuch, eine einheitliche Struktur zu erschaffen, um in diesem Netzwerk auch Karten innerhalb von Gebäuden

² IndoorOSM: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/IndoorOSM> [Zugriff am: 23.06.2016]

anbieten zu können. Allerdings soll dieses Format, laut einem Hinweis auf der offiziellen Webseite, nicht mehr verwendet werden. Die Mehrzahl der gefundenen, aktuellen Softwaresysteme zum Thema Indoornavigation in OpenStreetMap beruht allerdings immer noch auf IndoorOSM und es existieren diverse Tools, um aus dem Grundriss eines Gebäudes mit manuellen Bearbeitungen eine IndoorOSM-Datei zu erzeugen. Dazu gibt es zahlreiche weitere unstrukturierte Ansätze zur Modellierung von Innenraumumgebungen auf der Webseite von OpenStreetMap, wie beispielsweise das sog. Simple Indoor Tagging³, die allesamt eine mangelhafte Dokumentation und kaum umgesetzte Lösungen besitzen. [53, 54]

4.2.2 IFC

IFC⁴ (engl. Industry Foundation Classes) ist ein von buildingSMART International (bSI) geformter, offener Standard im Bauwesen zur Beschreibung und zum Austausch von digitalen, zwei- oder dreidimensionalen Gebäudemodellen. Er ist registriert unter ISO 16739 und liegt aktuell in Version 4.0 von 2014 vor. Eine IFC-Datei enthält logische und geometrische Informationen über Gebäudeelemente und deren Beziehungen, aber es fehlen topologische Verbindungen zwischen den einzelnen Objekten. Deshalb kann das IFC-Datenformat nicht direkt zur Indoornavigation benutzt werden und dient in erster Linie der Bauindustrie als BIM-Datenmodell. Allerdings lassen sich IFC- mit IndoorGML-Daten kombinieren. Es wird versucht, diese Lücken zu schließen, weshalb IFC in der Literatur zur Navigation innerhalb von Gebäuden häufig erwähnt wird. [52]

4.2.3 CityGML

CityGML⁵ (engl. City Geography Markup Language) ist ein Datenformat zum Darstellen, Speichern und Austauschen von virtuellen, dreidimensionalen Stadtmodellen. Es gehört zum OGC-Standard (engl. Open Geospatial Consortium) und liegt aktuell in der Version 2.0 von 2012 vor, die auf der Auszeichnungssprache GML (engl. Geography Markup Language) 3.2.1 basiert. Die Entwicklung von CityGML galt dem Gewinn und der Vereinheitlichung von digitalen Geoinformationen und nicht der Navigation. Herkömmliche CAD-Programme bieten Tools zum Erstellen von CityGML-Dateien an. Stadt- und Landschaftsobjekte werden in fünf verschiedenen Detailgraden (engl. Level of Detail - LOD) modelliert. In der vierten dieser Unterteilungen (LOD 4) stellt CityGML ein Modul für Gebäude und Innenarchitekturen zur Verfügung. Dort können jedoch ausschließlich geometrische Informationen erfasst werden, sodass dieses Format ebenfalls nicht ohne Anpassungen für die Indoornavigation genutzt

³ Simple Indoor Tagging: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Simple_Indoor_Tagging [Zugriff am: 20.07.2016]

⁴ IFC: <http://www.ifcwiki.org>, <http://www.buildingsmart.org> [Zugriff am: 23.06.2016]

⁵ CityGML: <http://www.citygml.org/> [Zugriff am: 22.06.2016]

werden kann, da für Routenberechnungen topologisches Wissen über die Verknüpfung verschiedener Elemente in einem Gebäude unabdingbar ist. Um diese Beziehungen besser darstellen zu können, wurde IndoorGML entwickelt, das im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt wird. Allerdings lassen sich in CityGML Objekte detaillierter beschreiben. [52, 55]

4.2.4 IndoorGML

IndoorGML⁶ (engl. Indoor Geography Markup Language) basiert ebenfalls auf GML 3.2.1, liegt aktuell in der Version 1.0 von 2014 vor und ist ein Kandidat bzw. Anwärter für den OGC-Standard. Ziel dieses Datenformates ist es, eine Bibliothek mit sowohl geometrischen, als auch topologischen und semantischen Informationen über Innenbereiche von Gebäuden zur Verfügung zu stellen. Dabei handelt es sich nicht um eine neue Entwicklung, sondern lediglich um eine Erweiterung bereits existierender Formate (u. a. IFC, CityGML) speziell für die Indoor-navigation. Teile einer IndoorGML-Datei können aus anderen Datenformaten gewonnen werden und externe Referenzen zu diesen enthalten. Des Weiteren existieren Tools, um aus einem Gebäudegrundriss mit manuellen Eingriffen eine IndoorGML-Datei zu erzeugen. Es soll zu einem Standardformat zum Speichern, Austauschen und Modellieren von Innenraummodellen für die Navigation innerhalb von Gebäuden geformt werden. IndoorGML besteht aus fünf allgemeinen Konzepten, die im Folgenden erläutert werden:

1. Zellnetzwerk

Innenbereiche werden als Netzwerk aus Zellen modelliert, die die kleinste Einheit darstellen (z.B. Räume). Jede Zelle hat einen eindeutigen Namen (z.B. ID, Raumnummer) und grenzt an andere Zelleinheiten. Benachbarte Zellen überlappen sich nicht. Positionsangaben können nur in Form des Zellnamens oder präziser zweid- oder dreidimensionaler Koordinaten angegeben werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit große Zellen, wie beispielsweise Hallen oder Korridore, in kleinere Bereiche zu unterteilen.

2. Semantik

Die semantische Repräsentation von IndoorGML ermöglicht die Identifikation verschiedener Zellarten und deren Verbindungen (z.B. Türen, Treppen, Fahrstühle). So kann beispielsweise zwischen navigierbaren (z.B. Räume, Gänge, Türen) und nicht-navigierbaren Bereichen (z.B. Wände, Hindernisse) unterschieden werden.

⁶ IndoorGML: <http://indoorgml.net/> [Zugriff am: 22.06.2016]

3. Geometrie

Das Bereitstellen von geometrischen Informationen zweid- oder dreidimensionaler Objekte gehört nicht zu den Hauptaufgaben von IndoorGML, da diese von anderen Datenformaten eindeutig beschrieben werden. Deshalb werden nachfolgende drei Möglichkeiten angeboten. Geometriedaten können durch eine externe Referenz (z.B. IFC, CityGML) eines anderen Formates, eigenständig in IndoorGML oder gar nicht beschrieben werden.

4. Topologie

Der sog. Node-Relation-Graph (NRG) repräsentiert die Beziehungen bzw. Verbindungen der Zellen in einer einfachen, abstrakten Darstellung. Dabei wird zwischen geometrischem und logischem NRG unterschieden. Dadurch kann IndoorGML zur Routenberechnung genutzt werden. Zur Abbildung von räumlichen Informationen in diese duale Graphstruktur wird die sog. Poincaré-Dualität ausgenutzt. Dreidimensionale Objekte (z.B. Räume) werden zu Knoten und zweidimensionale Oberflächen werden zu Kanten, die zwei Knoten verbinden (z.B. Türen).

5. Schichten

In der Datenbank eines Indoornavigationssystems gibt es mehrere unabhängige Schichten. Topologische Informationen über Räume und Gänge eines Gebäudes bilden eine Ebene, während in einer anderen beispielsweise die Abdeckung durch WLAN-Zugangspunkte des Innenbereiches zu finden ist. Jede Schicht formt ein eigenständiges Zellnetzwerk des Gebäudes. Da die Zellen nicht überlappen können, kann ein navigierbares Gerät in jeder Schicht nur in einer Zelle lokalisiert werden. Abbildung 4-1 zeigt in der linken Hälfte ein einfaches Beispiel für ein dreischichtiges Modell mit jeweils einem NRG für Topologie, WLAN- und RFID-Infrastruktur. Zwischen den Schichten können durch sog. Inter-Layer-Verbindungen Beziehungen hergestellt werden. Dies wird im rechten Ausschnitt von Abbildung 4-1 visualisiert.

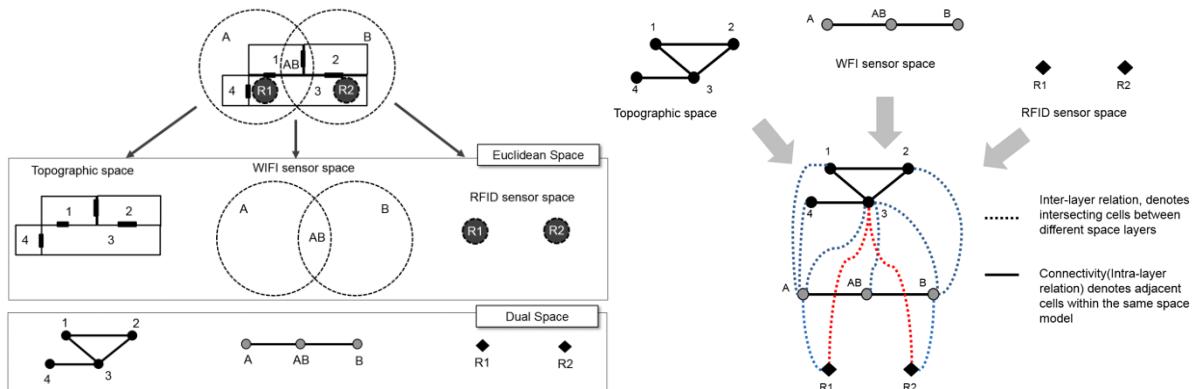


Abbildung 4-1: Links: Dreischichtiges IndoorGML Modell, Rechts: Inter-Layer-Verbindungen [56]

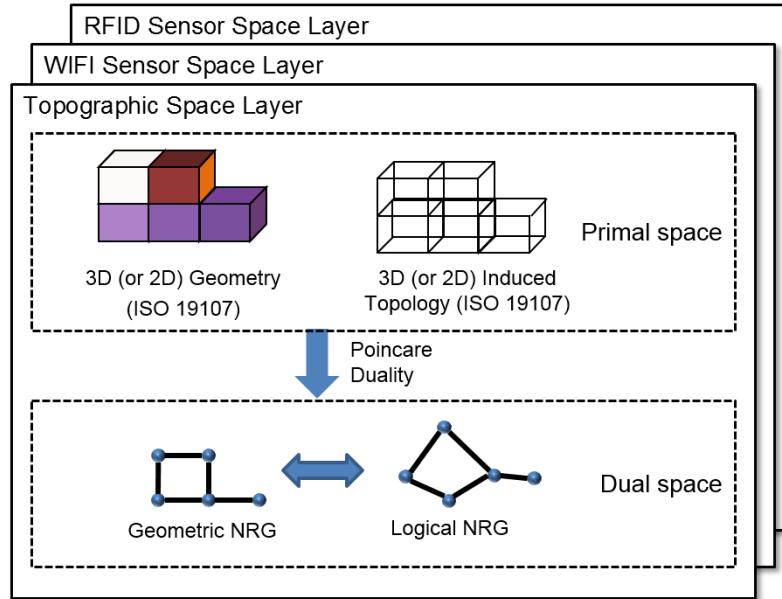


Abbildung 4-2: Strukturiertes (SSM) und mehrschichtiges (MLSM) Raummodell in IndoorGML [56]

Die fünf Konzepte werden auch als mehrschichtiges (engl. Multi-Layered Space Model - MLSM) und strukturiertes (engl. Structured Space Model - SSM) Raummodell bezeichnet. Wie in Abbildung 4-2 zu sehen ist, werden dualer und Ur-Raum, geometrische und topologische Informationen, sowie die einzelnen Schichten strikt voneinander getrennt. Um Innen- und Außenbereiche nahtlos miteinander zu verknüpfen und dem Ziel der universellen Navigation ein Stück weit näher zu kommen, dienen spezielle Fixpunkte (engl. Anchor Points) zur Umrechnung zwischen globalen und lokalen Koordinatensystemen und zum Umschalten zwischen Indoor- und Outdoornavigation. Jede IndoorGML-Repräsentation muss mindestens einen dieser Zugangspunkte besitzen, die im NRG als besondere Knoten hervorgehoben sind. IndoorGML ergänzt CityGML um die Bereitstellung von semantischen und topologischen Informationen und kann deshalb direkt zum Routing verwendet werden. Während in anderen Datenformaten der Fokus auf räumlichen und geometrischen Informationen über den Aufbau und die verbauten Materialien von Gebäuden und deren Räumen liegt, steht bei IndoorGML die Navigation im Mittelpunkt. [52, 55, 57]

4.3 Map Matching



Abbildung 4-3: Kartenabgleich (Map Matching), um Positionsinformationen und digitale Karte in Verbindung zu bringen (abgewandelt nach [58])

Sind Positions- und digitale Karteninformationen vorhanden, müssen diese beiden Komponenten miteinander kombiniert werden. Um die Sensordaten der verwendeten Lokalisierungstechnologie mit der zweidimensionalen Darstellung des Gebäudes bzw. der Datenbank zu verschmelzen und dem Benutzer des Navigationssystems den aktuellen Standort anzuzeigen, wird typischerweise ein sog. Kartenabgleichsalgorithmus (engl. Map Matching Algorithm) verwendet. Als Eingabe erhält dieser aktuelle Positionsinformationen und die digitale Karte des Gebäudes, die oft in Form eines Graphen vorliegt, und berechnet die am besten passende Position (Abbildung 4-3). Da jede Technik zur Positionsbestimmung eine gewisse Ungenauigkeit besitzt, können Lokalisierungen in nicht navigierbaren Bereichen zu bestmöglichen Standorten in navigierbaren Gebieten angepasst werden. Dabei fließen zahlreiche Faktoren, wie beispielsweise der bereits zurückgelegte Weg oder geschätzte zukünftige Aufenthaltsorte, in die Auswahl des Kartenabgleichs ein. Viele Navigationssysteme bieten zudem die Möglichkeit, die Ungenauigkeit der Standortbestimmung bzw. des Map-Matching-Algorithmus zu visualisieren. Dies geschieht in der Anwendung Google Maps mit einem blauen Kreis um die geschätzte Position des Benutzers (Abbildung 4-4). [18]

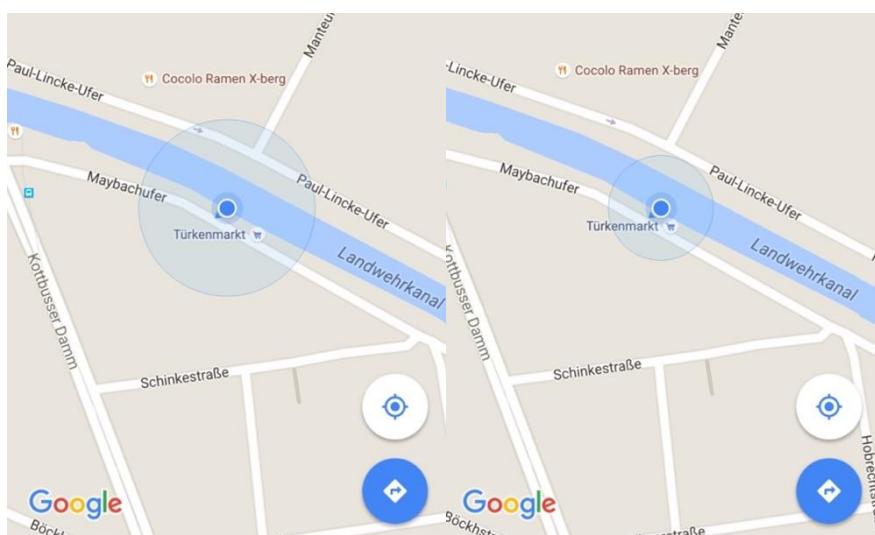


Abbildung 4-4: Google Maps (Apple iOS): Lokalisierungsungenauigkeit als blauer Kreis, Steigende Genauigkeit in der Positionsbestimmung in der rechten gegenüber der linken Bildschirmaufnahme (aufgenommen mit einem iPhone 6S)

5 Routing

Neben der Lokalisierungskomponente und einem Datenmodell benötigt ein Indoornavigationssystem ein Element, das dem Benutzer Anweisungen bereitstellt, um vom aktuellen Standort aus auf einer optimalem Route zu einer gewünschten Zielposition zu gelangen (Abbildung 2-2). Diese Aufgabe wird als Routing bezeichnet und beinhaltet zum einen das Berechnen des Weges aus der graphischen Repräsentation des Gebäudes der Datenbank und zum anderen das Umwandeln dieses Pfades in Navigationsanweisungen an den Nutzer der Applikation, die dieser Schritt für Schritt befolgen kann. Zunächst werden diverse Arten der Routenplanung und deren Benutzerpräsentation in einer kurzen Übersicht beschrieben (Kap. 5.1). Anschließend werden die drei beliebtesten Routingalgorithmen erläutert, die für das Errechnen der bestmöglichen Wege zuständig sind (Kap. 5.2).

5.1 Überblick

5.1.1 Arten der Routenplanung

Um optimales Routing bereitzustellen, sollte sich die Wegplanung an die verschiedenen Wünsche des Anwenders anpassen können. Gewöhnlich ist der bestmögliche Pfad der kürzeste oder der schnellste. Jedoch kann auch die Route mit den geringsten Richtungsänderungen oder Stockwerkswechseln die angenehmste darstellen. Ein nützlicher Vergleich zwischen verschiedenen Lösungen ist nicht immer möglich. Rollstuhlfahrer benötigen barrierefreie Wege und für sehbehinderte Personen ist es von Vorteil, möglichst einfache Routen entlang von Wänden einzuschlagen. Dazu sind beispielsweise in Museen oftmals Rundgänge entlang spezieller Sehenswürdigkeiten erwünscht. Dies beeinflusst ebenfalls die Routenführung. Ferner könnte der Zutritt zu einzelnen Gebäudeteilen nur zu bestimmten Öffnungszeiten oder mit speziellen Zutrittsrechten möglich sein. Des Weiteren wirken sich temporäre Situationen, wie beispielsweise Renovierungen, auf das Planen des Weges aus. Einige Lösungen berücksichtigen zudem Hindernisse entlang des Pfades, andere ignorieren diese. Der Bewegungsfluss kann durch intelligentes Routing ebenfalls gesteuert werden. Um Staus zu vermeiden, ist es sinnvoll alternative Pfade anzubieten, in denen sich weniger Menschen bewegen. Außerdem besteht die Möglichkeit zwischen verschiedenen Gruppen zu differenzieren und beispielsweise an einem Flughafen männlichen und weiblichen Personen, aufgrund der angrenzenden Geschäfte, unterschiedliche Routen zuzuweisen. [18, 19, 59, 60, 61]

5.1.2 Präsentation der Routen

Ein Routingalgorithmus ist dafür zuständig den optimalen Pfad nach den benutzerspezifischen Kriterien und den äußereren Umständen bzw. Echtzeitinformationen zu berechnen und diesen in Form von Anweisungen und Visualisierungen zu beschreiben. Das Risiko des Verlaufens sollte möglichst gering gehalten werden. Zur Präsentation der Routen werden zwei- oder dreidimensionale Kartendarstellungen oder Bilder der Umgebung verwendet, in denen die Wegbeschreibung in Form von Punkten, Linien oder Pfeilen visualisiert wird. Außerdem werden oft Sprachanweisungen, haptische Signale oder textuelle Beschreibungen verwendet bzw. zusätzlich zur Verfügung gestellt. Für sehbehinderte Personen sind akustische Befehle unerlässlich. In Abbildung 5-1 werden am Beispiel der Navigationsanwendungen „NAVVIS“ und des „BSB Navigators“ einerseits eine Augmented-Reality-Routenführung mittels Pfeilen auf dem Fußboden (linkes Bild) und andererseits typische zweidimensionale Linienanweisungen (mittleres und rechtes Bild), die aus Outdoornavigationssystemen hinreichend erprobt sind, dargestellt. Beim Verfolgen des von der Routingkomponente berechneten Pfades wird die aktuelle Position dynamisch ermittelt und auf der Kartendarstellung aktualisiert. Wenn der Benutzer vom berechneten Weg abweicht, also eine andere als die vorgeschlagene Route wählt, findet ggf. ein sog. Rerouting statt. Dabei geschieht vom neuen Standort aus abermals eine Planung des Weges zum gewünschten Ziel. Viele der derzeit verfügbaren Systeme für die Navigation innerhalb von Gebäuden bieten diese Funktion allerdings noch nicht an, die in der Outdoornavigation fast immer verfügbar ist. [18, 19, 59, 60, 61]

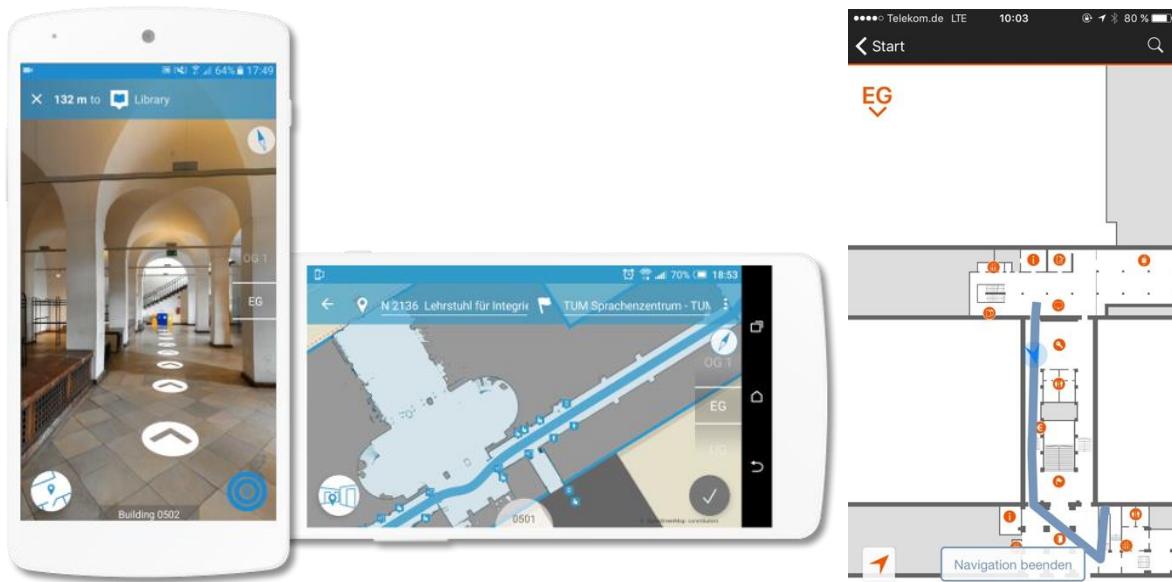


Abbildung 5-1: Links & Mitte: AR- und 2D-Navigationsanweisungen (NAVVIS [62]), Rechts: 2D-Navigationsanweisungen bzw. Visualisierung der berechneten Route (BSB Navigator [38])

5.2 Algorithmen

Im Folgenden werden mit dem Dijkstra-, A*- und Bellman-Ford-Algorithmus drei Routingverfahren beschrieben und gegenübergestellt, die in der Praxis und Literatur am häufigsten auftreten (Kap. 5.2.1). Dabei wird auf eine detaillierte Beschreibung der algorithmischen bzw. mathematischen Ebene verzichtet, da zahlreiche Werke dies vertiefend behandeln. Für nähere Informationen hierzu wird auf die angeführten Referenzen verwiesen, wobei die Übersicht der Fakultät für Mathematik der Technischen Universität München [63] besonders empfehlenswert ist. Anschließend werden verschiedenen Kriterien erläutert, die bei der Wahl des Routingalgorithmus beachtet werden müssen, und ein Blick auf die graphische Struktur geworfen, die zur Verwendung eines der beschriebenen Verfahren vorausgesetzt wird (Kap. 5.2.2).

5.2.1 Routingverfahren

In Tabelle 5-1 werden die wesentlichsten Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren miteinander verglichen. Die Algorithmen werden äquivalent für die Outdoor- und Indoornavigation verwendet und stellen den mathematischen Teil einer Routingkomponente dar. Voraussetzung für die Anwendung ist eine graphische Repräsentation der Umgebung in einem entsprechenden Datenmodell, das Routingfunktionen bereitstellt (Kap. 4), und benutzerspezifische Kriterien über die Art der gewünschten Route.

Tabelle 5-1: Vergleich zwischen Dijkstra-, A*- und Bellman-Ford-Algorithmus hinsichtlich Geschwindigkeit, Verwendungsmöglichkeit und Qualität der Ergebnisse (abgewandelt und ergänzt nach [18])

Algorithmus	Vorteile	Nachteile
Dijkstra	<ul style="list-style-type: none"> immer optimale Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> keine negativen Gewichte in der Kostenfunktion langsam (für große Netze)
Bellman-Ford	<ul style="list-style-type: none"> negative Gewichte in der Kostenfunktion immer optimale Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> sehr langsam
A*	<ul style="list-style-type: none"> schnell 	<ul style="list-style-type: none"> keine negativen Gewichte in der Kostenfunktion nicht immer optimale Lösung (abhängig von Heuristik)

Der nach seinem niederländischen Entwickler Edsger Dijkstra benannte Algorithmus ist das beliebteste und bekannteste Verfahren zur Lösung von Wegfindeproblemen. Dazu werden Orte als Knoten in einem Graphen modelliert, die durch Kanten verbunden sind, welche die Wege

zwischen zwei Orten repräsentieren und die Kosten bzw. Gewichte enthalten, die aufgewendet werden müssen, um diese Strecke zu überwinden. Diese sog. Kostenfunktion kann beispielsweise durch die Distanz oder die Reisezeit zwischen zwei Knoten dargestellt werden. Der Dijkstra-Algorithmus berechnet, mathematisch bewiesen, immer den optimalsten Weg in einem Graphen von einem Start- zu einem oder mehreren Zielknoten. Dabei werden vom Startpunkt aus pro Schritt, die anhand der gewählten Kostenfunktion, günstigsten Wege zu den momentan erreichbaren Knoten berechnet. Sind alle Verbindungen besucht und keine Verbesserungen mehr möglich, kann der optimale Pfad vom gewünschten Ziel zum Start entlang der Kanten zurückverfolgt werden. Trotz diverser Optimierungen gibt es keine Lösung des Dijkstra-Verfahrens, deren Zeitkomplexität keine direkte Proportionalität zur Anzahl der Knoten im Graphen aufweist, da stets alle Knoten im Netzwerk untersucht werden. Aufgrund dieser linearen Abhängigkeit benötigt der Algorithmus bei großen Netzen eine lange Zeit zur Berechnung des Ergebnisses. Zudem können negative Gewichte in der Kostenfunktion nicht verarbeitet werden.

In einem derartigen Szenario ist das Verwenden des Bellman-Ford-Algorithmus notwendig, der auch negative Kosten berücksichtigt und ebenfalls den optimalsten Pfad berechnet. Allerdings besitzt er eine schlechtere Zeitkomplexität als die Lösung von Dijkstra, weshalb in der Regel versucht wird, Werte der Kostenfunktion kleiner als Null zu vermeiden.

Der sog. A*-Algorithmus hingegen stellt eine Erweiterung des Verfahrens von Dijkstra dar, der den Geschwindigkeitsnachteil für große Netze behebt, aber nicht in jedem Fall zu einem optimalen Ergebnis führt. Die A*-Kostenfunktion eines Knotens setzt sich aus tatsächlichen, vom Startpunkt zurückgelegten, und geschätzten Kosten bis zum Ziel zusammen, die von einem heuristischen Modell bestimmt werden. Dies führt zu einer zielgerichteten Suchmöglichkeit und somit zur Verringerung der Laufzeit. Die verwendete Heuristik darf die tatsächlichen Kosten niemals überschätzen. Wenn beispielsweise die Distanz zwischen zwei Knoten als Kostenfunktion verwendet wird, könnte die Luftlinie zwischen beiden Orten, also der euklidische Abstand, als heuristische Funktion dienen. Deren Wert ist nie größer als der effektive Weg. Die Wahl der Heuristik beeinflusst die Performanz des A*-Algorithmus direkt. Das Verfahren findet immer eine Lösung, allerdings ist diese nicht in jedem Fall optimal. Darüber hinaus kann die A*-Methode, genauso wie der Algorithmus von Dijkstra, keine negativen Kosten bzw. Gewichte behandeln. [18, 60, 61, 63]

5.2.2 Graphische Struktur und Auswahl des Verfahrens

Die Größe des Routingnetzwerkes bzw. die Anzahl der Knoten im Graphen, die verfügbare Rechenleistung und die Art der Kantengewichte beeinflussen die Entscheidung, welches Verfahren gewählt wird. Diese Eigenschaften und die verwendete Datenstruktur zum Modellieren und Speichern der Innenraumumgebung und der Routinginformationen üben Einfluss

auf die Leistungsfähigkeit des Algorithmus aus. Die Antwortzeit stellt dabei einen wichtigen Faktor dar, da sich diese direkt auf die Performanz des gesamten Navigationssystems auswirkt. Der Benutzer möchte Wege zu diversen Zielen in möglichst kurzer Zeit berechnet und auf der Karte visualisiert bekommen. Speziell beim Rerouten ist ein schneller Routingalgorithmus essentiell, da in diesem Fall der Pfad in Echtzeit während der Bewegung des Navigationsgerätes kalkuliert wird. Im Allgemeinen beruhen sämtliche Methoden zur Lösung von Wegfindeproblemen auf einer graphischen Struktur, die die Umgebung repräsentiert. Ein Ort (z.B. detaillierte Koordinatenangaben oder gesamter Raum) wird durch Knoten modelliert. Herrscht eine Verbindung zwischen zwei Knoten (z.B. benachbarte Koordinaten oder Tür), sind diese mit einer Kante verknüpft, für deren Überqueren gewisse Kosten aufgewendet werden müssen. Die Gewichte der Kostenfunktion variieren je nach Art der gewünschten Route. Für jedes Szenario (z.B. kürzeste, schnellste oder barrierefreie Route) existiert ein separates Kostenmodell. Typischerweise werden hierfür Distanzen oder Reisezeiten zwischen den Knoten verwendet. Je nach gefordertem Bewegungsmodus erfolgt eine Aufteilung des Routingnetzwerkes in navigierbare und nicht navigierbare Bereiche. Beispielsweise können Treppen bei dem Wunsch nach einer barrierefreien Route nicht betreten werden und erhalten somit ein unendlich hohes Gewicht gegenüber stufenfreier Verbindungen im Routinggraphen, sodass diese Wege zur optimalen Pfadbestimmung nicht einbezogen werden. [18, 59, 60, 61]

6 Project Tango

Nachdem in den vorausgegangenen Kapiteln sämtliche Komponenten eines Indoornavigationssystems erläutert wurden, wird in diesem Abschnitt die Tango-Technologie von Google als Beispiel für eine Technik vorgestellt, die keine externe Hardwarestruktur benötigt, um Navigationsfunktionen in Innenbereichen bereitzustellen. Nach einem kurzen Überblick (Kap. 6.1) erfolgt eine Einführung in die Hardware (Kap. 6.2) und Konzepte (Kap. 6.3) des Project Tango.

6.1 Überblick der Technologie

Project Tango ist eine von Googles „Advanced Technology and Projects Group“ (ATAP) entwickelte und 2014 erstmalig veröffentlichte Technologieplattform für Android Tablets und Smartphones. Mit dem Vorbild der räumlichen Wahrnehmung des Menschen sollen mobile Endgeräte mit den Konzepten Motion Tracking (Bewegungsverfolgung), Area Learning (Umgebungswiedererkennung) und Depth Perception (Tiefenwahrnehmung) eine neuartige Erfassung der physischen Umgebung erlangen. Dabei werden moderne Sensoren, Methoden der Bildverarbeitung und Maschinelles Sehen (Inertiale und Visuelle Odometrie) miteinander kombiniert. Typische Anwendungsgebiete sind Indoornavigation, Vermessungs- und Rekonstruktionssoftware und Augmented- bzw. Virtual-Reality-Applikationen. Zunächst wird eine genaue Messung der relativen Positionierung des Geräts bezüglich eines Startpunktes ermöglicht. Durch das Wiedererkennen von visuellen Merkmalen bereits durchlaufener Gebiete werden mit der Dauer der Aufnahme wachsende Ungenauigkeiten in der relativen Position korrigiert. Es ist auch eine Lokalisierung bezüglich einer vorherigen Aufnahme möglich. Zusätzlich kann das Project Tango mit speziellen Sensoren Tiefeninformationen über jeden Bildausschnitt gewinnen und dem Anwender in Form einer sog. Punktewolke (engl. Point Cloud) räumliche Informationen über die Umgebung zur Verfügung stellen. [64, 65, 66, 67]

6.2 Geräte und Hardware

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit befindet sich das Project Tango noch in der Entwicklungsphase, weshalb derzeit nur Prototypen bzw. Entwicklungsgeräte zu erwerben sind. Das „Peanut Phone“ (Abbildung 6-1, linkes Bild) war Anfang 2014 das erste Entwicklungsgerät mit der Tango-Technologie auf dem Markt. Es wurde bereits im Juni 2014 durch das „Yellowstone Tablet“ (Abbildung 6-1, rechtes Bild) ersetzt.



Abbildung 6-1: Links: erstes Entwicklungssmartphone [68], Rechts: aktuelles Entwicklungstablet [69]

Das sieben Zoll große Gerät ist mit hochgradig moderner Hardware ausgestattet. Neben einem Infrarot-Projektor befindet sich eine Weitwinkelkamera (Fisheye) mit einem Aufnahmewinkel von bis zu 160 Grad. Links davon ist zusätzlich eine vier Megapixel RGB-Infrarot-Kamera verbaut. Zudem befinden sich in dem Gerät eine Vielzahl an Sensoren, unter anderem ein Beschleunigungssensor, Umgebungslichtsensor, Barometer, Kompass, GPS und ein Gyroskop, die in der Regel in allen aktuellen Smartphones zu finden sind. Betrieben wird das Tablet von einem NVIDIA Tegra K1 Prozessor. Es verfügt über vier Gigabyte Arbeitsspeicher und 128 Gigabyte internen Flashspeicher. Die vorinstallierte Betriebssystemversion Android 4.4 KitKat kann nicht aktualisiert werden. Abbildung 6-2 zeigt die Vorder- und Rückseite des Tablets mit den Positionen der sichtbaren Sensoren. Mit diesem wurde die im nachfolgenden Kapitel 7 beschriebene Applikation entwickelt. Da dieses Tablet das zum Verfassungszeitpunkt dieser Arbeit einzige verfügbare Tango-Gerät ist, wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff Tablet häufig für alle Geräte mit Project Tango Technologie verwendet. Für detaillierte Hardwareinformationen wird auf die Webseite des Entwicklers⁷ und der Analyse der Komponenten des Tablets von IFIXIT⁸ verwiesen. Im September 2016 wird Google in Kooperation mit Lenovo ein erstes kommerzielles Smartphone mit der Tango-Technologie auf den Markt bringen. Sollte das Lenovo Phab 2 Pro⁹ von den Konsumenten angenommen werden und sich die Technik von Google etablieren, könnte ein Meilenstein in der Forschung zur Indoornavigation erreicht werden. [70, 71]

⁷ Google - Project Tango Development Kit: <https://developers.google.com/tango/hardware/tablet> [Zugriff am: 06.07.2016]

⁸ IFIXIT – Project Tango Tablet Teardown:

<https://de.ifixit.com/Teardown/Project+Tango+Tablet+Teardown/28148> [Zugriff am 03.05.2016]

⁹ Lenovo Phab 2 Pro: <http://shop.lenovo.com/de/de/tango/> [Zugriff am: 04.07.2016]

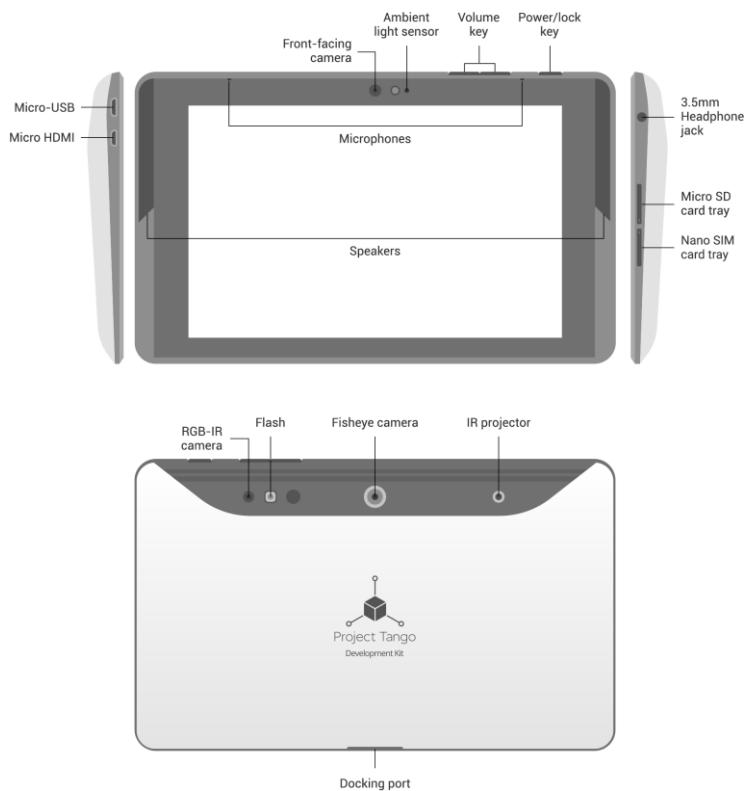


Abbildung 6-2: Vorderseite (oben) und Rückseite (unten) des „Yellowstone Tablets“ [70]

6.3 Konzepte

6.3.1 Motion Tracking

Motion Tracking ermöglicht es dem Gerät, seine Bewegungen durch Gebiete relativ zur Herkunft zu verfolgen. Google verwendet für die relative Positionsbestimmung des Project Tango Tablets bezüglich des Startpunktes der Aufnahme (engl. Origin) die Technik der sog. Visuellen und Inertialen Odometrie (engl. Visual-Inertial-Odometry - VIO). Dies ist eine Kombination der bereits im Verlauf dieser Arbeit erläuterten Verfahren der Trägheitsnavigation (Kap. 3.2.3) und der Visuellen Odometrie (Kap. 3.2.4). Dabei werden Änderungen in der Position des Geräts mit der Weitwinkelkamera erfasst, indem relative Unterschiede anhand verschiedener Merkmale in den Bildaufnahmen erkannt werden (bis zu 60 Bilder pro Sekunde). Diese Besonderheiten sind zum Beispiel Eckpunkte von Objekten, die mittels Kantenerkennung ermittelt werden können. Dabei orientiert sich Google am menschlichen Auge, das einen Sehwinkel von bis zu 180 Grad besitzt. Die verwendete Fisheye-Kamera kann Bilder mit einem Winkel von bis zu 160 Grad aufnehmen. Beispielsweise ist es möglich aus zwei Aufnahmen eines Apfels auf einem Tisch von verschiedenen Distanzen durch die Größen- und Positionsänderung der Frucht in den beiden Fotos die relative Bewegung der Kamera zu identifizieren. Diese Technik wird anschließend mit den Sensordaten der Inertialen Odometrie bzw. der

integrierten IMU fusioniert (bis zu 100 Messungen pro Sekunde). Dadurch wird die Präzision der Echtzeitinformationen bezüglich Position und Orientierung (sechs Freiheitsgrade) des Tablets erhöht. Project Tango ist ein sog. Soft-Echtzeitsystem, da der Android-Linux-Betriebssystemkern keine Garantien bezüglich der Ausführungszeit von Befehlen geben kann. Deshalb enthalten sämtliche Messergebnisse (Sensoren, Positionen, etc.) stets Zeitstempel. Eingeschränkt wird die Bewegungsverfolgung jedoch durch wachsende Abweichungen der Messergebnisse mit zunehmender Zeitdauer der Aufnahme. Dieses Verhalten ist charakteristisch für jegliche Odometriesysteme. Kleine Differenzen in einzelnen Messungen führen auf Dauer zu großen Fehlern in der Relativposition. Außerdem besteht bisher kein Bezug zu vorherigen, zuvor aufgenommenen Aufzeichnungen und allein durch Motion Tracking ist keine globale Lokalisierung möglich. Die Details des Verfahrens, welche spezifischen Techniken zur Merkmalserkennung und Differenzberechnung eingesetzt werden, sind nicht explizit von Google veröffentlicht. Jedoch können in der Arbeit von Tröster [67] einige Hinweise dazu gefunden werden. [72, 67]

6.3.2 Area Learning

Die angesprochenen Beeinträchtigungen des Motion Tracking bei alleinstehender Nutzung werden durch parallele Anwendung von Area Learning behoben. Dieses Prinzip der Umgebungswiedererkennung ist des Öfteren auch unter dem Namen SLAM (engl. Simultaneous Localization and Mapping) bekannt. Dabei werden markante Stellen in den Kameraaufnahmen des Motion Tracking (z.B. Ecken, Kanten) in Form von mathematischen Beschreibungen abgespeichert. Diese können bei erneutem Erfassen durch die Kamera schnell wiedererkannt werden. Die Methode kann auch den Fingerprinting-Verfahren (Kap. 3.1.3d)) zugeordnet werden. Hierbei kann wiederum der Bezug zur menschlichen Wahrnehmung gezogen werden. Bei mehrmaligem Besuchen eines Ortes orientiert sich der Mensch anhand früherer Erinnerungen oder Merkmale, die das Gehirn reproduziert. Durch Area Learning wird die Genauigkeit der relativen Positionsbestimmung auch bei längerer Aufzeichnungsdauer gewährleistet. Sobald das Gerät auf dem linken Bild in Abbildung 6-3 den Startpunkt (engl. Origin) der Aufnahme wiedererkennt, da dieser Ort zuvor schon durchlaufen wurde, wird die zunehmend abweichende, errechnete Position des Motion Trackings (rote Linie) angepasst. Zudem ist eine globale Lokalisierung bezüglich eines zuvor erlernten Gebietes möglich (Abbildung 6-3, rechtes Bild). Dazu können sog. Area-Description-Files (ADF) erzeugt und abgespeichert werden, die Bildaufzeichnungen eines bestimmten Gebietes rekonstruieren. Die Lokalisierung innerhalb eines geladenen ADFs erfolgt immer in Bezug auf den Startpunkt der Aufnahme der Datei. Somit sind auch Mehrspieler-Anwendungen möglich, indem auf mehreren Geräten ein gemeinsames ADF geladen wird. Auch bei diesem Konzept bleiben die Details von Google verborgen. Für möglichst genaue, effiziente und flüssige Bewegungsverfolgung (Motion Tracking) und Umgebungswiedererkennung (Area Learning) sollten in den

ADFs eine Vielzahl von Aufnahmen aus den verschiedensten Orientierungen und Sichtwinkeln mit unterscheidbaren Merkmalen gespeichert werden. In einem Gebiet mit vielen identischen Räumen oder zahlreichen weißen Wänden ist es für das Tango-Tablet schwierig, Besonderheiten auszumachen. Zudem müssen Veränderungen in der Umgebung (z.B. Licht im Verlauf des Tages, Bewegungen von Personen, Hinzufügen von Möbeln, etc.) berücksichtigt werden. [73]

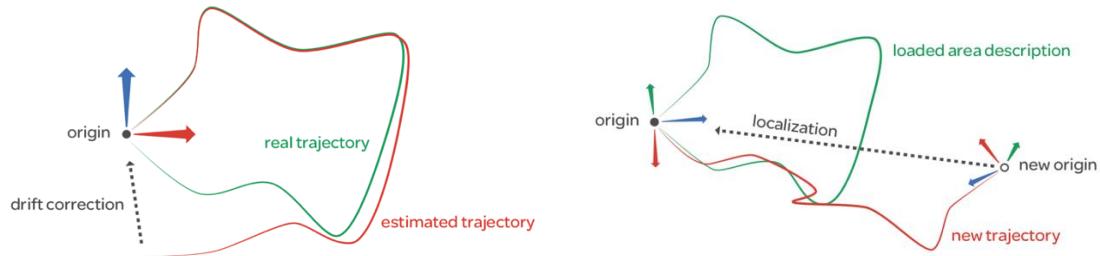


Abbildung 6-3: Links: Korrektur des Motion Tracking, Rechts: Lokalisierung durch Area Learning [73]

6.3.3 Depth Perception

Unabhängig von den beiden bereits beschriebenen Konzepten fungiert Depth Perception zur Gewinnung von Tiefeninformationen. Distanzen in der realen Welt können in Kombination mit Motion Tracking ermittelt werden. Mit Infrarot und Stereometrie werden zwei verschiedene Verfahren angewendet. Bei Infrarot werden TOA-Messungen (Kap. 3.1.2b)) und die Methode des Strukturierten Lichts verwendet. Der Infrarot-Laserprojektor streut Punkte im infraroten Spektrum in den Raum, durch die mittels der Infrarot-RGB-Kamera eine sog. Punktewolke (engl. Point Cloud) erzeugt wird. Der Nachteil hierbei ist die Beeinflussung der Messungen durch Licht, weshalb reflektierende, lichtabsorbierende Gegenstände (z.B. schwarze Objekte, LCD-Displays), lichtdurchlässige Objekte (z.B. Glas) und Gebiete in der Nähe von Lichtquellen schwer zu erfassen sind. Deshalb wird zusätzlich mit Hilfe von Triangulation (Kap. 3.1.3b)) ein Stereometrieverfahren mit den beiden verbauten Kameras eingesetzt. Dies spiegelt erneut die visuelle Wahrnehmung der Menschen durch zwei Augen wider, die sich in geringem Abstand zueinander befinden. Laut Google liefert die Tiefenwahrnehmung optimale Funktionalität innerhalb geschlossener Räume mit einer Reichweite von einem halben bis vier Metern. Durch dieses Konzept können dreidimensionale Modelle bzw. Rekonstruktionen von Objekten in der realen Welt erzeugt werden, Räume und Gegenstände vermessen und zudem virtuelle Objekte in die reale Welt eingefügt werden (Augmented Reality, Virtual Reality). [74]

7 Entwicklung einer Kartierungsapplikation

Der sog. Local Area Guide der Universität der Bundeswehr München ist ein am Institut für Software Engineering der Fakultät für Elektrotechnik und Technische Informatik betreutes Projekt für die Navigation auf dem Campusgelände. Bisher findet die Wegplanung ausschließlich bis zu den Eingängen von Gebäuden statt. Eine Erweiterung für Innenbereiche ist somit der nächste Schritt der Entwicklung. Für das Betreiben eines Indoornavigationssystems sind Kartenmaterialien der Innenräume in einem entsprechenden Datenmodell (Kap. 4) notwendig. Fehlende Gebäudepläne führten u. a. zu der Entscheidung, zunächst eine Kartografieapplikation mit der Tango-Technologie von Google zu entwerfen, die Gebäude kartiert, zweidimensionale Grundrisse formt und die Daten in ein, für die Indoornavigation verwendbares, Datenformat konvertiert. Außerdem schlugen sämtliche Versuche, derartige Informationen mit diversen Softwaretools aus zweidimensionalen Plänen zu extrahieren, fehl. Anschließend könnte eine Navigationsanwendung die erzeugten Daten und Pläne verwenden und mit einer beliebigen Lokalisierungstechnologie Indoornavigation auf dem Campus zur Verfügung stellen. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Entwicklung der Applikation Graphmapper¹⁰. Zunächst wird das Entwurfskonzept zur Implementierung (Kap. 7.1) dargestellt. Anschließend folgt eine Bewertung bzw. eine Evaluation der erreichten Ergebnisse (Kap. 7.2) und in einem abschließenden Ausblick wird die Integration der Anwendung in den bestehenden Local Area Guide diskutiert (Kap. 7.3).

7.1 Konzept

Der nachfolgende Abschnitt gliedert sich in die Beschreibung der Rahmenbedingungen des Projekts (Kap. 7.1.1), die Darlegung des entworfenen Modells eines Indoornavigationsgraphen (Kap. 7.1.2) und der Implementierung der Anwendung (Kap. 7.1.3). Für ausführlichere Informationen zu letzterem Abschnitt wird auf die JavaDoc-Dokumentation verwiesen, die auf der beiliegenden DVD (Anhang 9.3) und im GitHub-Verzeichnis¹⁰ von Graphmapper zu finden ist.

¹⁰ Tango Graphmapper 1.0 (Demo) – 2D floor plan mapping for indoor navigation graph network

Google Play Store: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.projecttango.unibw.graphmapper>

GitHub: https://github.com/King-Konsto/graphmapper_demo/tree/master

[Zugriff am: 06.07.2016]

7.1.1 Rahmenbedingungen

Die Anwendung ist mit dem Entwicklungstablet „Yellowstone“ von Google, das zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit einzig verfügbare Gerät mit Tango-Technologie, und dem Betriebssystem Android 4.4 (KitKat) entstanden. Als Entwicklungsumgebung (IDE) wurde Android Studio in der Version 2.0 und als Programmierschnittstelle (API) die Java-API von Tango in der Version 1.37 (Okul) gewählt. Alternativ ist für Tango-Applikationen auch eine Unity- und eine C-Umgebung verfügbar. Die Wahl fiel auf Java, da eine objektorientierte Programmiersprache gegenüber der Spiele- bzw. 3D-Engine Unity und dem hardwarenahen, nativen C im Szenario der Indoornavigation zu bevorzugen ist. Graphische Strukturen sind einfach realisierbar und das bereits existierende „Floorplan“-Beispiel [75] dient als Grundlage bei der Entstehung von Graphmapper. Für nähere Angaben zu den diversen Entwicklungsmöglichkeiten mit Tango wird auf die Webseite des Herstellers [65] verwiesen.

7.1.2 Modellierung eines Indoornavigationsgraphen

Die Problematik des fehlenden, standardisierten Datenformats zur Repräsentation von Innenbereichen zur Indoornavigation ist in Kapitel 4 dieser Arbeit ausführlich beschrieben. Da das Kartenmaterial des Local Area Guides der Universität der Bundeswehr München nach der Arbeit von Buchmann [76] bisher im OSM-Datenformat vorliegt, wäre das Verwenden eines mit dem OpenStreetMap-Netzwerk kompatiblen Formats (Kap. 4.2.1) sinnvoll, um ein optimales Zusammenspiel zwischen Indoor- und Outdoornavigation zu fördern. Die Nutzung der vielversprechenden Lösung IndoorGML (Kap. 4.2.4) wäre ebenso denkbar. Für beide Datenmodelle gibt es bisher jedoch kein funktionstüchtiges Tool zum Betrachten bzw. Visualisieren von Dateien. Somit können entstandene Graphen nicht derartig verifiziert werden. Deshalb wird in diesem Softwareprojekt das nachfolgende Modell als Indoornavigationsgraph verwendet. Dieses orientiert sich an IndoorGML und lässt durch die schlichte Struktur die Möglichkeit zur einfachen Konvertierung in ein Wunschformat offen.

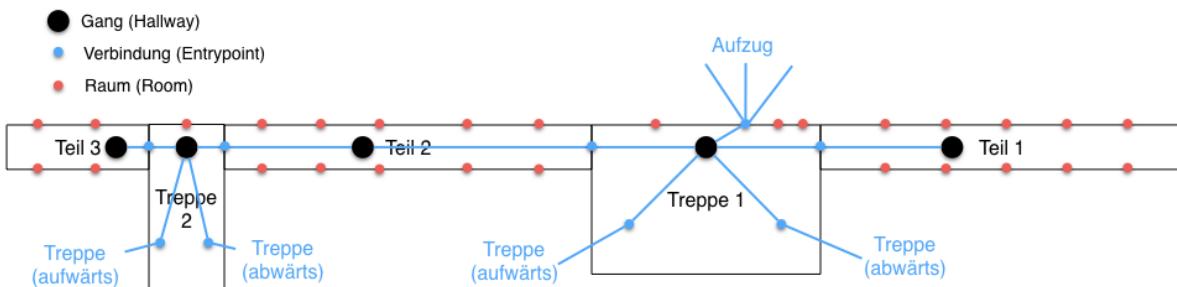


Abbildung 7-1: Graphische Repräsentation des fünften Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München (Zeichnung nicht maßstabsgetreu)

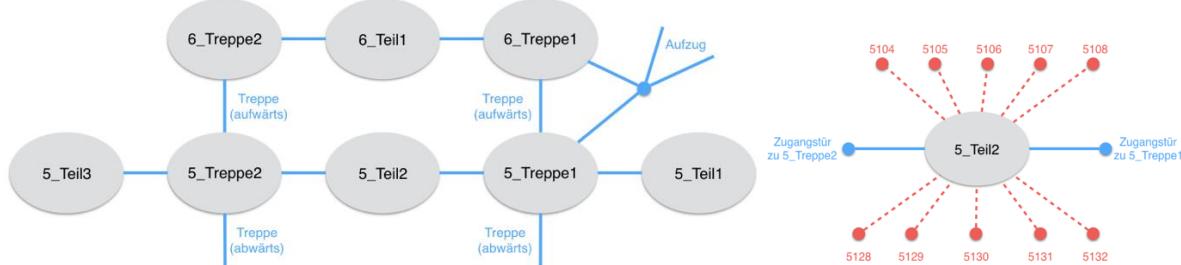


Abbildung 7-2: Links: Hallwaynetzwerk des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München, Rechts: Hallway „5_Teil2“ im Detail

Ein Gebäude wird in Zellen aus Gängen (*Hallway*) unterteilt, die mittels Zugangspunkten (*Entrypoint*) verknüpft sind. Diese repräsentieren Zwischentüren (*DOOR*), Treppen (*STAIRS*) oder Aufzüge (*LIFT*). Ein Gang kann eine beliebige Anzahl von Räumen (*Room*) beinhalten. Die Konzeption der derartigen Modellierung dient dem Zweck, den Aufwand der Kartierung und die Größe des Navigationsnetzwerkes zu begrenzen. Da ein Navigationsziel auf dem Campusgelände in der Regel durch ein Büro, ein Labor oder einen bestimmten Raum eines Gebäudes dargestellt wird, ist es ausreichend, die Indoornavigation an der Tür zu diesen Objekten enden zu lassen, zumal der gesuchte Ort bereits erreicht worden ist. Innerhalb eines solchen Raumes ist keine weitere Navigation erforderlich. Außerdem gilt es dort, die Privatsphäre der Mitarbeiter zu schützen. Natürlich kann auf diese Abstraktion verzichtet werden, indem Räume ebenfalls als Hallway mit einer Tür als Entrypoint (*DOOR*) modelliert werden. Des Weiteren können Gänge eine Menge von Markierungen (*Marker*) besitzen, die beispielsweise die Positionen von Landmarken, wie Beacons oder QR-Codes, festhalten können. Die Knoten des Indoornavigationsgraphen bilden demnach Hallways, die mittels Entrypoints als Kanten verbunden sind. Für den Rest dieser Arbeit werden die Begriffe Hallway, Entrypoint, Room und Marker für die Elemente des Konzepts verwendet. Abbildung 7-1 zeigt eine nicht maßstabsgetreue Zeichnung des fünften Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München mit dem beschriebenen Modell. Die Etage besteht aus vier, durch Zwischentüren getrennte, Hallways, die allesamt diverse Räume enthalten. In den beiden Treppenhäusern befinden sich zusätzlich Entrypoints zu den darüber- und darunterliegenden Geschoßen in Form von Treppen und einem Aufzug. In Abbildung 7-2 ist auf der linken Seite der Graph bzw. das Hallwaynetzwerk des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes und im rechten Teil eine vergrößerte Darstellung des Knotens „5_Teil2“ zu sehen, in der die interne Struktur des Ganges mit sämtlichen Räumen abgebildet ist. Ein weiterer Beispielgraph ist in Abbildung 7-3 anhand einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding dargestellt, in dem zusätzlich das Marker-Element zu finden ist, das in diesem Fall ein Fenster kennzeichnet.

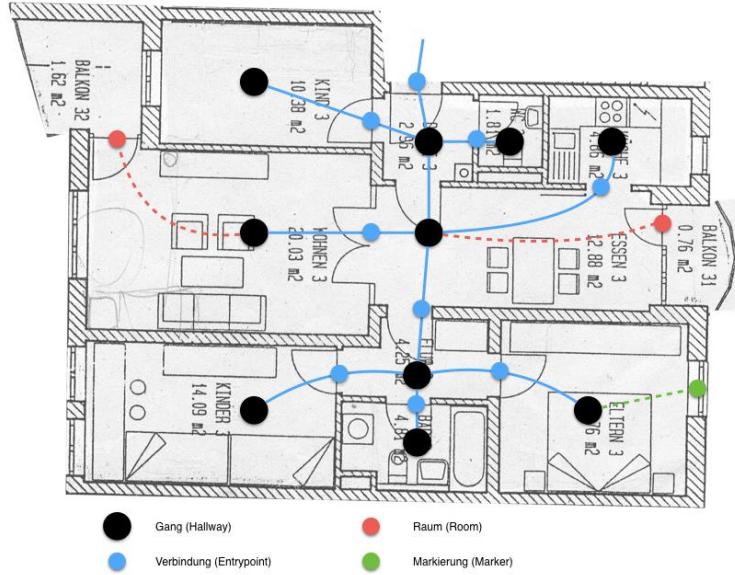


Abbildung 7-3: Graphische Repräsentation einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding

7.1.3 Implementierung

a) Umsetzung des Navigationsgraphmodells

Für die Umsetzung des entworfenen Konzepts ist das Package „graph“ der Applikation Graphmapper zuständig. Eine vereinfachte Darstellung der Klassendiagramme ist in Abbildung 7-4 zu finden. Neben den bereits erläuterten Elementen Hallway, Entrypoint, Room und Marker, gibt es ferner eine Klasse Graph, in der das gesamte Hallwaynetzwerk bzw. der Indoornavigationsgraph in Form einer HashMap (*mHallwayNet*) gespeichert wird. Die Zuordnung erfolgt mit einer Identifikationsnummer (ID), weshalb zwei Integer-Variablen zur Verwaltung erforderlich sind (*mHallwayIDCounter*, *mSavedIDCounter*). Jedes Hallway-Objekt besitzt eine individuelle ID (*mID*), eine Liste von Eckpunkten (*mHallwayPoints*), die den Gang begrenzen, einen Namen (*mName*), eine Zuordnung zu einem Stockwerk (*mLevel*) und je eine Liste für die vorhandenen Verbindungen bzw. Entrypoints (*mConnections*), Räume (*mRooms*) und Markierungen (*mMarker*). Des Weiteren besteht die Möglichkeit, diverse Hindernisse in einem Gang auszuschneiden (*mCuttedObstacleList*). Dazu werden deren äußere Begrenzungspunkte gesichert. Die Klassen Room und Marker benötigen lediglich Attribute zum Speichern der Position (*mPosition*) und zur Benennung (*mNumber* bzw. *mName*). Eine Instanz eines Entrypoints enthält, neben Standort (*mPositionFrom*) und Bezeichnung (*mName*), die ID des Hallway-Objekts (*mHallwayFromID*), in dem der Zugangspunkt liegt, und Listen für Lage (*mPositionToList*) und Hallway-Identifikationsnummern (*mHallwayToIDList*) der verbundenen Entrypoints. Die Art der Verknüpfung wird in einem Attribut des Aufzählungstyps MeasurementType (*mType*) abgelegt. Zugangspunkte können Zwischentüren (*DOOR*), Aufzüge (*LIFT*) oder Treppen (*STAIRS*) repräsentieren. Außerdem wird in dieser Enumeration

zwischen den verschiedenen Aktionsmöglichkeiten unterschieden, die beim Benutzen von Graphmapper auftreten. So können Wand-, Hindernis-, Raum-, Markierungs- und Entrypointmessungen (*WALL*, *CUT*, *ROOM*, *MARKER*, *ENTRY*) vorgenommen werden. Letztere werden nachträglich vom Benutzer in eine der drei obigen Kategorien eingeteilt.

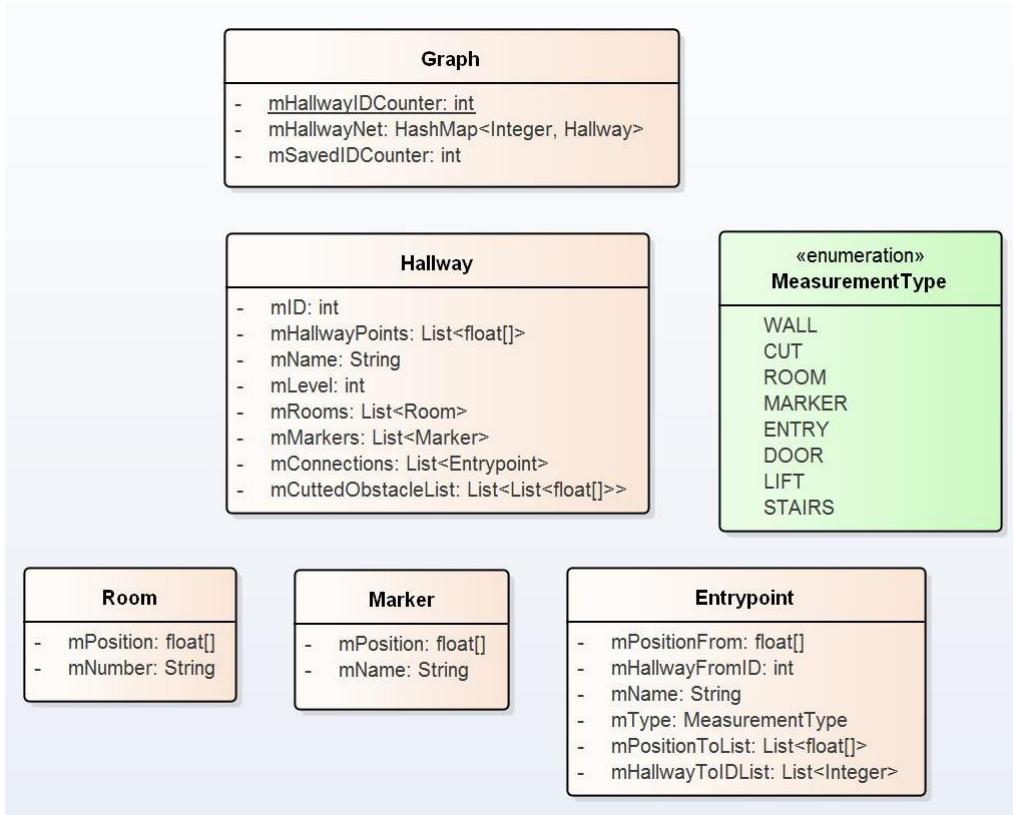


Abbildung 7-4: Indoornavigationsgraph bzw. -netzwerk: Übersicht der Klassendiagramme aus dem Package „graph“ (vereinfachte Darstellung ohne Funktionen bzw. Methoden)

b) Anwendungsfälle

Um die Funktionsweise von Graphmapper mit den nachfolgenden Aktivitätsdiagrammen ausführlich zu erläutern, werden zunächst die in Abbildung 7-5 zu sehenden Anwendungsfälle der Applikation beschrieben. Im sog. Aufzeichnungsmodus erhält der Benutzer die RGB-Kamera als Hintergrundansicht. Abgesehen von den bereits dargelegten fünf Mess- bzw. Markierungsarten, die durch Antippen der entsprechenden Stelle des Kamerabildes auf dem Touchscreen des Tablets hervorgerufen werden, können zuletzt getätigte Messungen rückgängig bzw. die aktuelle Hallwayaufnahme vollständig zurückgesetzt werden. Entrypoints können beim Anlegen oder nachträglich miteinander verknüpft werden, um so die Beziehungen zwischen den einzelnen Hallway-Objekten herzustellen. Funktionen zum Hinzufügen von neuen Hallways und ganzen Stockwerken vervollständigen den Aufzeichnungsmodus. In der sog. Kartenansicht können die intern erzeugten, zweidimensionalen Gebäudepläne für eine ganze Ebene oder separat für eine Hallway betrachtet werden. Optional können dabei die Längen der jeweiligen Wandabschnitte, Hindernisse, und die sog. Orte von Interesse (POIs)

angezeigt werden, zu denen in dieser Anwendung Instanzen der Klassen Room, Marker und Entrypoint zählen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die Namen der Objekte ein- oder auszublenden. Die Pläne können als Bilddatei (JPG) im internen Speicher des Geräts gesichert werden. Dort wird beim Beenden des Aufzeichnungsmodus auch der geschaffene Graph des Indoornavigationsnetzwerkes und das ADF abgelegt, da zur Lokalisierung in der Umgebung das Konzept des Motion Tracking in Verbindung mit Area Learning genutzt wird. Tiefeninformationen erhält das Programm durch Depth Perception. Sämtliche Positionsangaben werden in der gesamten Applikation in Form typischer, dreidimensionaler Koordinaten als Array des Datentyps Float gespeichert und beziehen sich auf den Start der Aufnahme. Falls eine vorherige Sitzung geladen wird, ist zuerst eine Relokalisierung bezüglich des zuvor erzeugten ADFs notwendig, bevor der Nutzer die Aufzeichnung fortsetzen oder den sog. Viewer-Modus starten kann. In diesem steht lediglich die Kartenansicht zur Verfügung. Allerdings kann dort zusätzlich die aktuelle Position des Tablets auf der Karte sichtbar gemacht werden. Dies ist in den anderen Fällen aufgrund von Einschränkungen in der API von Google bisher nicht möglich. Ein Neustarten der Anwendung durch den Benutzer ist ebenfalls implementiert.

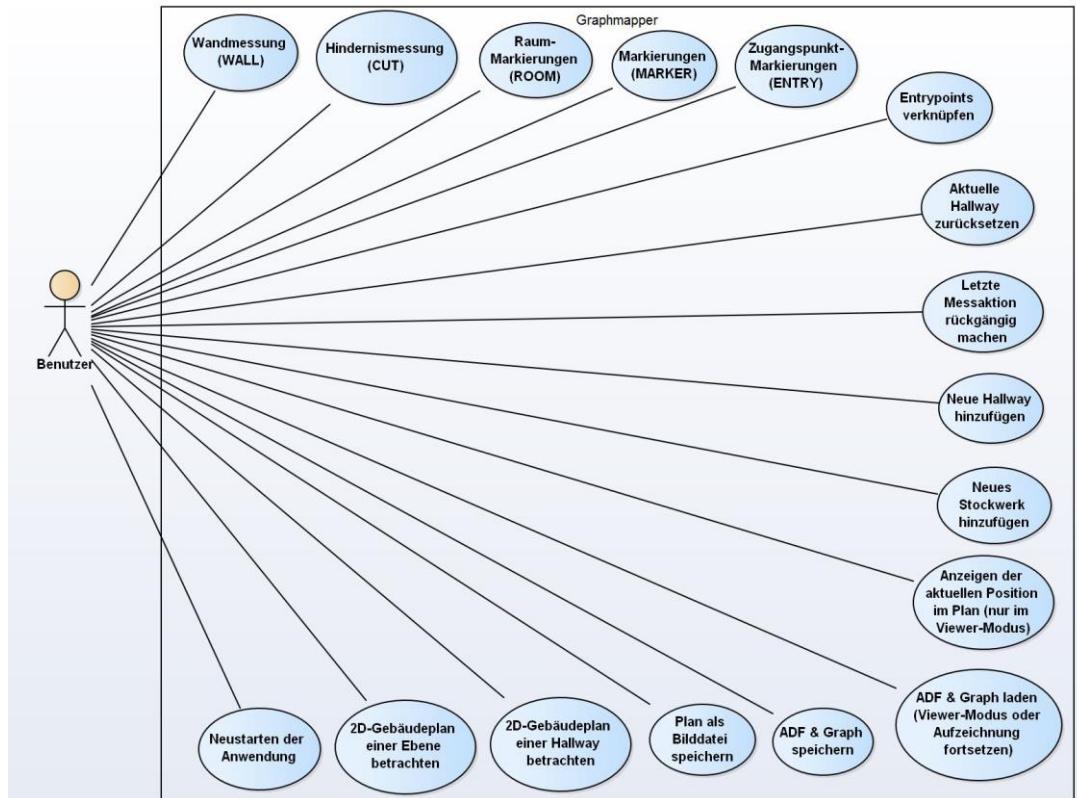


Abbildung 7-5: Übersicht über die wichtigsten Anwendungsfälle der Applikation GraphMapper

c) Klassenübersicht

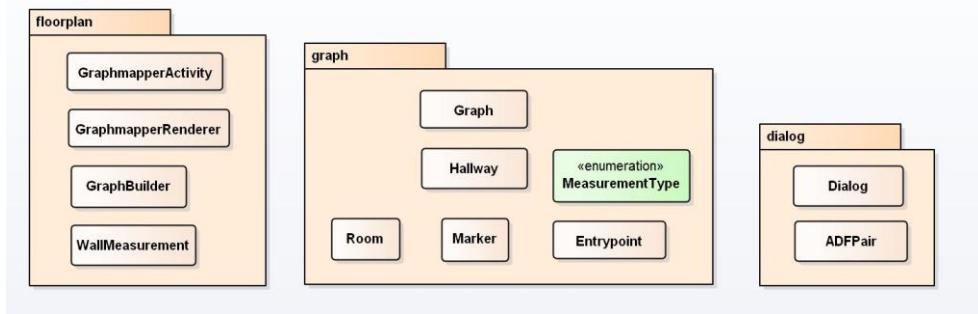


Abbildung 7-6: Packagestruktur und deren Klassen in der Anwendung Graphmapper

Abbildung 7-6 stellt die Packagestruktur von Graphmapper dar. Nachdem die Klassenbibliothek „graph“ zu Beginn dieses Teilkapitels bereits beschrieben wurde, folgt hiermit eine kurze Darstellung der Aufgaben der übrigen Klassen. Im Package „floorplan“ befindet sich die Klasse GraphmapperActivity. Dies ist die Hauptaktivität des Programms. Eine Android-Applikation besteht aus einer oder mehreren sog. Activities, die jeweils unterschiedliche Aufgaben erfüllen. In dieser Arbeit werden die einzelnen Bausteine einer Android-Anwendung nicht näher erläutert, weshalb hierfür auf die offizielle Entwicklungswebseite des Betriebssystems [77] verwiesen wird. GraphmapperActivity initialisiert das System und die Benutzeroberfläche, regelt das Verhalten beim Pausieren, Anhalten, Fortsetzen und Neustarten der Applikation und sorgt für die Verknüpfung aller Klassen. Zudem erfolgt hier die Verarbeitung der Daten des Systems (u. a. Kamera, Bewegungsverfolgung, Tiefenwahrnehmung, Benutzeingaben) in Echtzeit und die Steuerung des Programmablaufs. Für die Bildsynthese ist der sog. GraphmapperRenderer zuständig, der weitgehend auf dem „Floorplan“-Beispiel von Google beruht, das die 3D-Engine Rajawali [78] benutzt. Hierbei werden virtuelle Rechtecke für die benutzerspezifischen Messungen bzw. Markierungen (*WALL*, *CUT*, *ROOM*, *MARKER*, *ENTRY*) mittels AR-Echtzeitrendern in die reale Kameraansicht projiziert. Die Klasse GraphBuilder besteht ausschließlich aus statischen Klassenmethoden. Neben Funktionen zur Skalierung der Gebäudepläne auf die Bildschirmgröße des Tango-Tablets, werden hier Hallway- (mit beinhaltenden Hindernissen), Room-, Marker- und Entrypoint-Instanzen aus den rohen Messdaten erzeugt. Diese sind zunächst in Form von WallMeasurement-Objekten, nach Typ differenziert, in Listen abgelegt und beinhalten u. a. die Positionen der Elemente in Bezug auf den Startpunkt des ADF. Mit Hilfe der Tiefenwahrnehmung des Geräts können zunächst Ebenen entlang der Wände geformt und anschließend miteinander geschnitten werden. Auf diese Art und Weise entstehen die Eckpunkte einer Hallway und eines Hindernisses. Dabei muss die Aufnahme der jeweiligen Messpunkte im oder gegen den Uhrzeigersinn erfolgen, da die Schnittoperation jeweils zwischen zwei nacheinander aufgezeichneten Messungen durchgeführt wird. Außerdem müssen zur Funktionsfähigkeit zumindest drei Werte bzw. Wände vorhanden sein. Die Z-Koordinate (Höhe der WallMeasurement-Instanz) spielt bei diesem Vorgang keine Rolle, da lediglich zweidimensionale Gebäudepläne erzeugt werden.

Abbildung 7-7 verdeutlicht das Vorgehen. Die Klasse Dialog des gleichnamigen Packages beinhaltet sämtliche statische Klassenmethoden zur Kontrolle der Benutzereingaben. Durch geführte Dialoge können beispielsweise Objekte benannt oder die Verbindungen eines Entrypoints ausgewählt werden. Außerdem befindet sich in dieser Klassenbibliothek noch die Hilfsklasse ADFPair, die Paare aus lesbaren Namen und UUIDs (engl. für Universally Unique Identifier) von ADFs bildet, da diese im internen Speicher nur durch derartige Identifikatoren abgelegt sind.

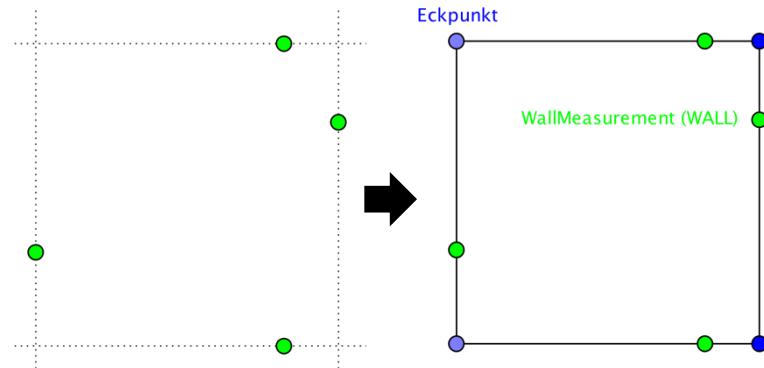


Abbildung 7-7: Entstehungsprozess der Eckpunkte durch Schneiden von Ebenen, die durch Wandmessungen (WallMeasurement) und der Tiefenwahrnehmung des Geräts entstehen

d) Programmablauf

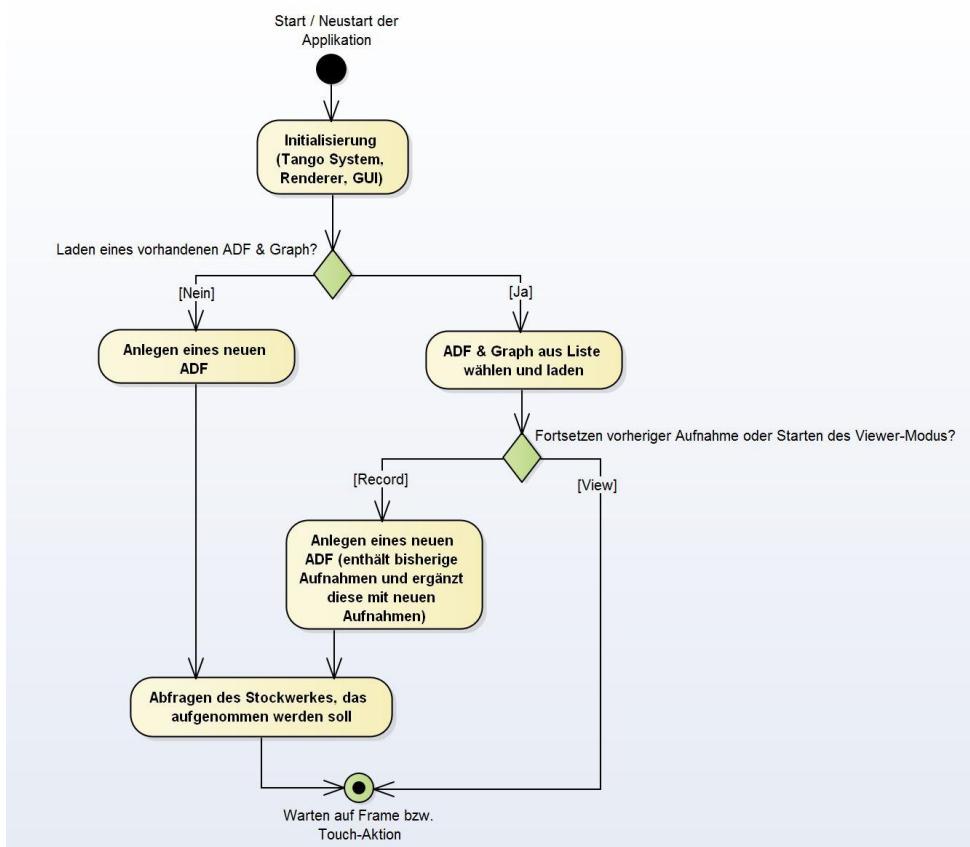


Abbildung 7-8: Aktivitätsdiagramm der Initialisierungsphase der Anwendung

Nachfolgend werden einige der wesentlichen Programmabläufe beschrieben und in Form von Aktivitätsdiagrammen visualisiert. Abbildung 7-8 stellt die Initialisierungsphase der Anwendung dar, die bei erstmaligem Aufruf oder bei einem Neustart der Applikation abgearbeitet wird. Nach der grundlegenden Initialisierung des Systems (Tango, Renderer, Benutzeroberfläche) steht der Nutzer vor der Wahl, eine neue Aufnahme zu beginnen oder eine vorherige zu laden (ADF und Graph). Im ersten Fall wird eine neue Area-Description-Datei erzeugt und nach Eingabe des aktuellen Stockwerks in einem Benutzerdialog beginnt der Aufzeichnungsmodus, in dem auf das nächste verfügbare Kamerabild (Frame) und Eingaben auf dem Touchscreen des Tablets gewartet wird. Demgegenüber wird nach erfolgreichem Laden einer bereits vorhandenen Aufnahme und der Entscheidung diese fortzusetzen eine Kopie des geladenen ADFs angelegt, die im Anschluss mit den neuen Informationen ergänzt wird. Die Angabe des als nächstes aufzuzeichnenden Geschoßes ist ebenso erforderlich. Sollte sich der Benutzer für den Viewer-Modus entscheiden, ist die Initialisierungsphase nach dem Ladevorgang beendet.

In Abbildung 7-9 ist das Verhalten der Applikation nach Erhalten eines neuen RGB-Kamerabildes zu sehen. Da das Tango-Tablet ein sog. Soft-Echtzeitsystem (Kap. 6.3.1) ist, besitzen sämtliche Messdaten Zeitstempel. Deshalb wird dieser, sobald ein neues Einzelbild bzw. ein sog. Frame zur Verfügung steht, zunächst aktualisiert. Hierfür gibt es zwei Variablen, die für die Sicherung der aktuellen und der vorherigen Zeitinformationen der Kamerabilder zuständig sind. Der Programmfluss wird nur fortgesetzt, falls es sich um einen neuen Zeitstempel bzw. ein neues Einzelbild handelt. Anschließend wird aus dem Frame die derzeitige Position der Kamera in Bezug auf den Startpunkt der ADF-Aufnahme berechnet. Aus dieser kann in einem späteren Schritt ohne größeren Aufwand auf die Lage und Orientierung des Tango-Geräts geschlossen werden. Sollte es sich um eine gültige Positionsangabe (*POSE_VALID*) handeln, wird der vorherige Zeitstempel auf den Wert des aktuellen gebracht und der Frame wird dem Renderer zur Verfügung gestellt, sodass dieser die Kameraansicht im Hintergrund der Benutzeroberfläche aktualisieren kann. Nähere Informationen zu Positionsdaten des Tablets sind der Entwicklungsseite [79] zu entnehmen. Falls die Aufzeichnung ein geladenes ADF aus einer früheren Sitzung besitzt, erfolgt nach diesem Schritt noch die einmalige Ausgabe einer Meldung über die erfolgreiche Relokalisierung bzw. erscheint im Viewer-Modus ein Button, mit dem der Benutzer in die Kartenansicht gelangen kann. In diesem Fall weist der Statuscode nicht den Wert *POSE_VALID* auf, bis eine relokalierte Positionsangabe verfügbar ist.

Parallel zur Bearbeitung neuer Kamerabilder verarbeitet Graphmapper Eingaben des Benutzers auf dem Touchscreen des Geräts (Abbildung 7-10). Je nach Typ der ausgewählten Messung (*WALL*, *CUT*, *ROOM*, *MARKER*, *ENTRY*) drückt der Anwender auf die entsprechende Stelle des Bildschirms mit den RGB-Kameraaufnahmen im Hintergrund. Aus der zweidimensionalen Klickposition, den Tiefeninformationen (Punktwolke) und den visuellen Daten wird ein dreidimensionaler Punkt im Raum berechnet und eine WallMeasurement-Instanz erzeugt. Je nach Lichtverhältnissen und Abstand des Tablets zur ausgewählten Position (optimal zwischen

einem halben und vier Metern) besteht die Möglichkeit des Fehlschlagens dieser Messung, das durch eine entsprechende Fehlermeldung visualisiert wird. Bei erfolgreicher Aktion wird das Objekt, je nach Messart, in die entsprechende Liste eingeordnet und in Form eines AR-Rechtecks durch den Renderer an der kalkulierten Position auf dem Display dargestellt. Im Viewer-Modus werden Touchgesten nicht verarbeitet.

Das Aktivitätsdiagramm in Abbildung 7-11 veranschaulicht den Programmablauf beim Hinzufügen einer neuen Hallway bzw. Abschließen der aktuellen. Die Verhaltensweise bei Erweiterung des Graphen um ein neues Stockwerk ist nahezu identisch, mit dem Unterschied der zusätzlichen Angabe der neuen Etagennummer. Beide Aktionen können durch Betätigen eines entsprechenden Buttons ausgeführt werden. Zunächst wird geprüft, ob mindestens drei Wandmessungen (WALL) vorhanden sind, die benötigt werden, um einen Raum zu formen. Anschließend erfolgt die Benennung der aktuellen Hallway in einem Benutzerdialog, das Entfernen aller Elemente aus dem Renderer und die Aktualisierung sämtlicher Positionsangaben der WallMeasurement-Objekte. Danach wird eine neue Instanz der Klasse Hallway und deren Räume, Markierungen, Hindernisse, Eck- und Zugangspunkte erzeugt und in die Graphstruktur eingefügt. Zuletzt werden alle temporären Variablen zurückgesetzt und die Listen zur Speicherung der fünf unterschiedlichen Messungen geleert. Die Aufnahme eines neuen Ganges oder Raumes kann beginnen.

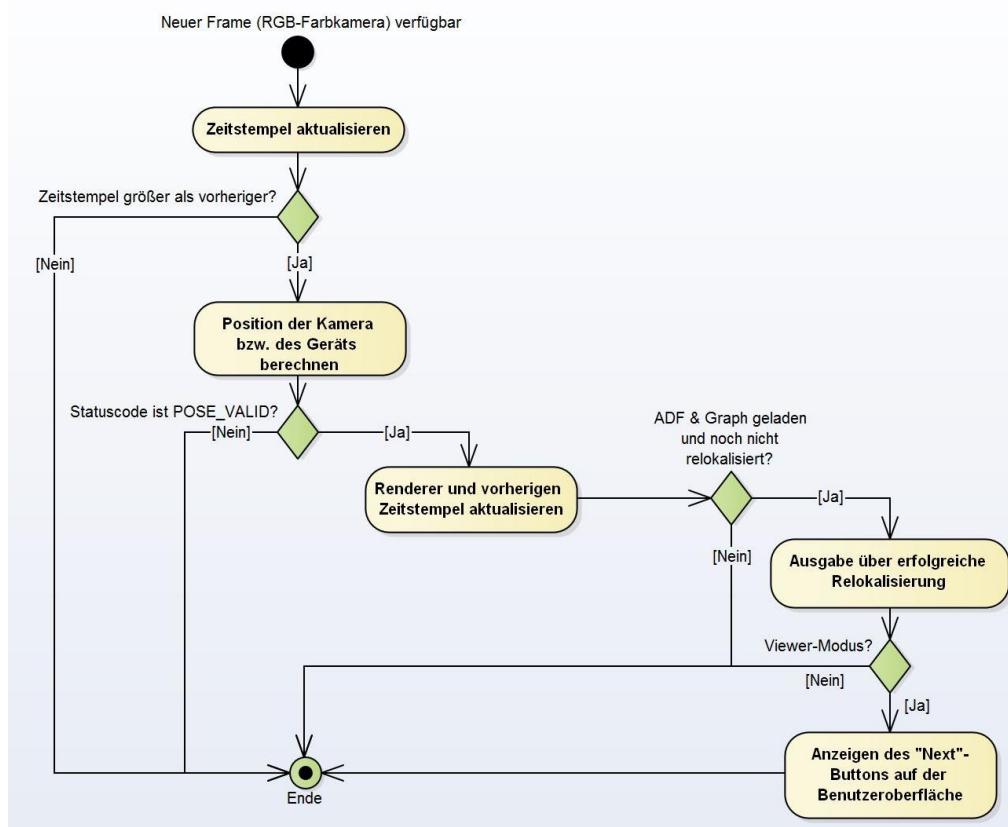


Abbildung 7-9: Aktivitätsdiagramm zum Verhalten des Programms bei Erhalten eines neuen Frames

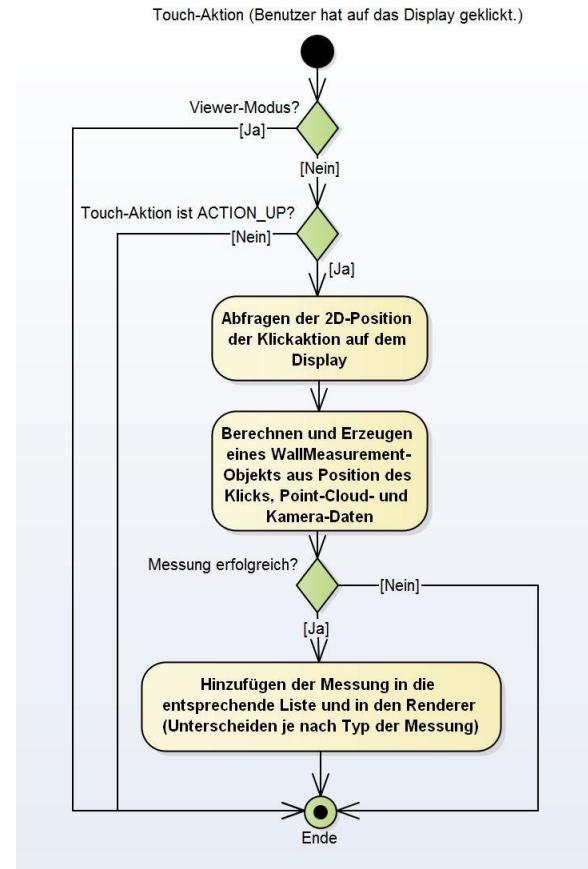


Abbildung 7-10: Aktivitätsdiagramm zum Verhalten des Programms bei Anklicken von Displaypositionen

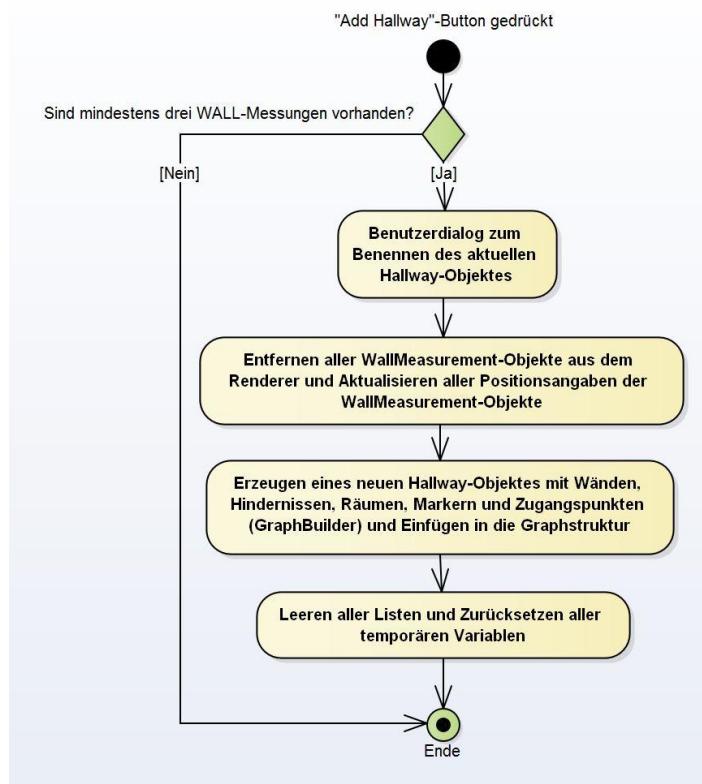


Abbildung 7-11: Aktivitätsdiagramm zum Hinzufügen einer neuen Hallway

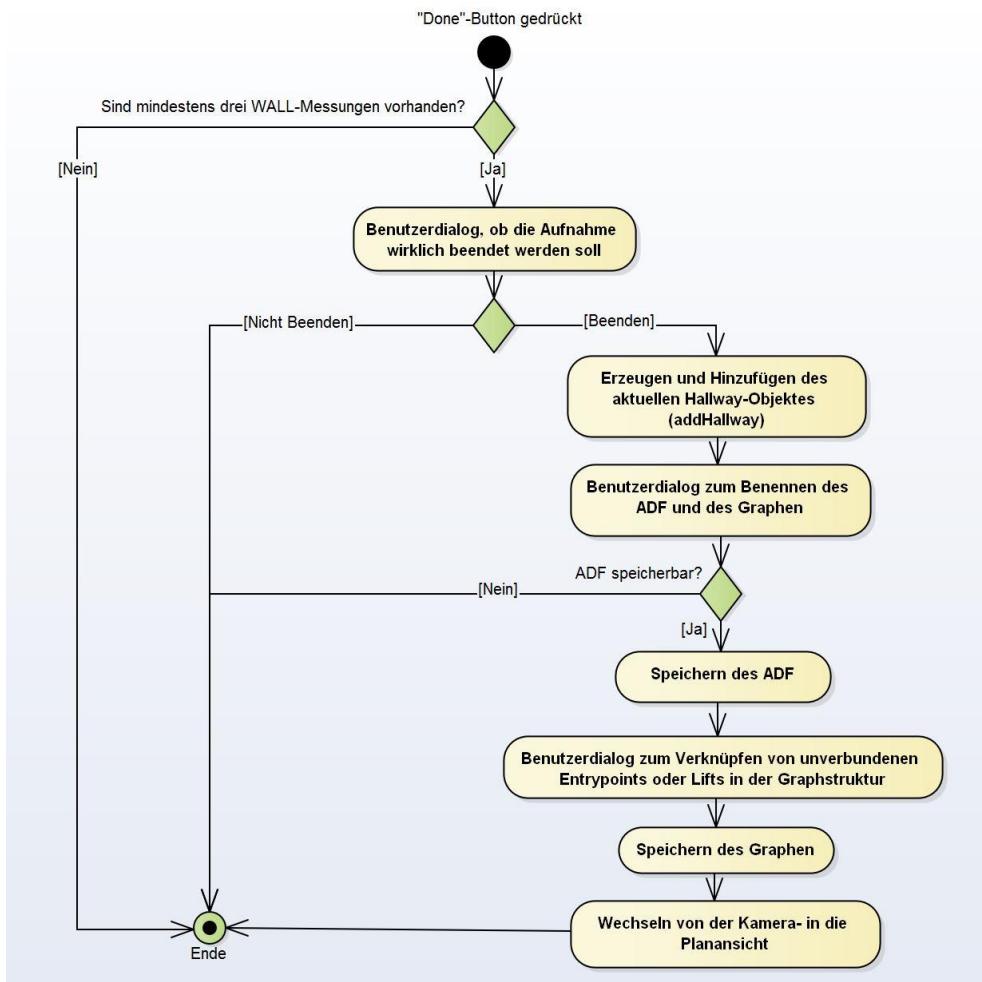


Abbildung 7-12: Aktivitätsdiagramm zum Beenden des Aufzeichnungsmodus

Abschließend wird in Abbildung 7-12 das Verhalten der Applikation beim Beenden des Aufzeichnungsmodus betrachtet. Die Aktion kann wiederum durch einen Button gestartet werden. Nach Prüfung der vorhandenen Mindestanzahl an Wandmessungen und dem ausdrücklichen Wunsch des Benutzers, die Aufnahme zu beenden, wird die aktuelle Hallway entsprechend dem bekannten Vorgehen aus Abbildung 7-11 erzeugt und dem Graphen hinzugefügt. Daraufhin erscheint ein Dialog zum Benennen des Indoornavigationsnetzwerkes und des ADFs. Ist dieses speicherbar, besteht die Option der Verknüpfung von Entrypoints. Schließlich erfolgt nach dem Sichern der Area-Description-Datei und des Graphen der Wechsel in die Kartenansicht.

7.2 Evaluation

Nachdem die Rahmenbedingungen, das Konzept des Indoornavigationsgraphen und die wichtigsten Punkte des Vorgehens bei der Implementierung bekannt sind, wird die entstandene Applikation Graphmapper nachfolgend bewertet und evaluiert. Dabei wird zunächst die Bedienweise des Programms anhand dessen Benutzeroberfläche (GUI) beschrieben (Kap. 7.2.1). Anschließend erfolgt eine Beurteilung der von der Anwendung berechneten Gebäudepläne hinsichtlich Längenangaben und Qualität der Grundrisse (Kap. 7.2.2), wobei Referenzmessungen mit einem Laser-Entfernungsmessgerät vorgenommen werden, und einer Verifikation der erzeugten graphischen Netzwerke (Kap. 7.2.3).

7.2.1 Benutzeroberfläche (GUI)



Abbildung 7-13: Aufzeichnungsansicht der Applikation Graphmapper

Abbildung 7-13 zeigt eine Bildschirmaufnahme des Aufzeichnungsmodus der Anwendung. Diverse Buttons, deren Funktionen in der Darstellung beschriftet sind, liegen über dem Kamerabild als Hintergrund. Außerdem sind zwei virtuelle Augmented-Reality-Rechtecke zu sehen, die in die reale Welt projiziert werden, um die Wandmessungen zu visualisieren. Durch Betätigen der „Done“-Schaltfläche gelangt der Benutzer in die Kartenansicht, die in Abbildung 7-14 dargestellt ist. Dort befinden sich erneut zahlreiche Bedienschalter zum Auswählen der gewünschten Visualisierungsoptionen der Gebäudepläne. In diesem Fall ist der Grundriss eines ganzen Stockwerkes einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding mit beschrifteten Hallways zu sehen. Im linken Teil von Abbildung 7-15 ist eine vergrößerte Darstellung der Hallway „Esszimmer“

abgebildet, in der zusätzlich die Längen der Wandabschnitte und die Positionen und Namen der Orte von Interesse angezeigt werden. Im rechten Abschnitt dieser Abbildung ist ein Bildschirmausschnitt des Viewer-Modus nach erfolgreicher Relokalisierung abgedruckt, in dem der Benutzer durch den „Next“-Button in den Kartenmodus wechseln kann. Zuvor ist dieser ausgeblendet und lediglich ein Neustart der Applikation möglich. Zusätzlich zu den vorliegenden Bildschirmaufnahmen demonstriert ein Video, das auf der beiliegenden DVD (Anhang 9.3) oder der Internetplattform YouTube¹¹ zu finden ist, die Bedien- und Funktionsweise von Graphmapper.

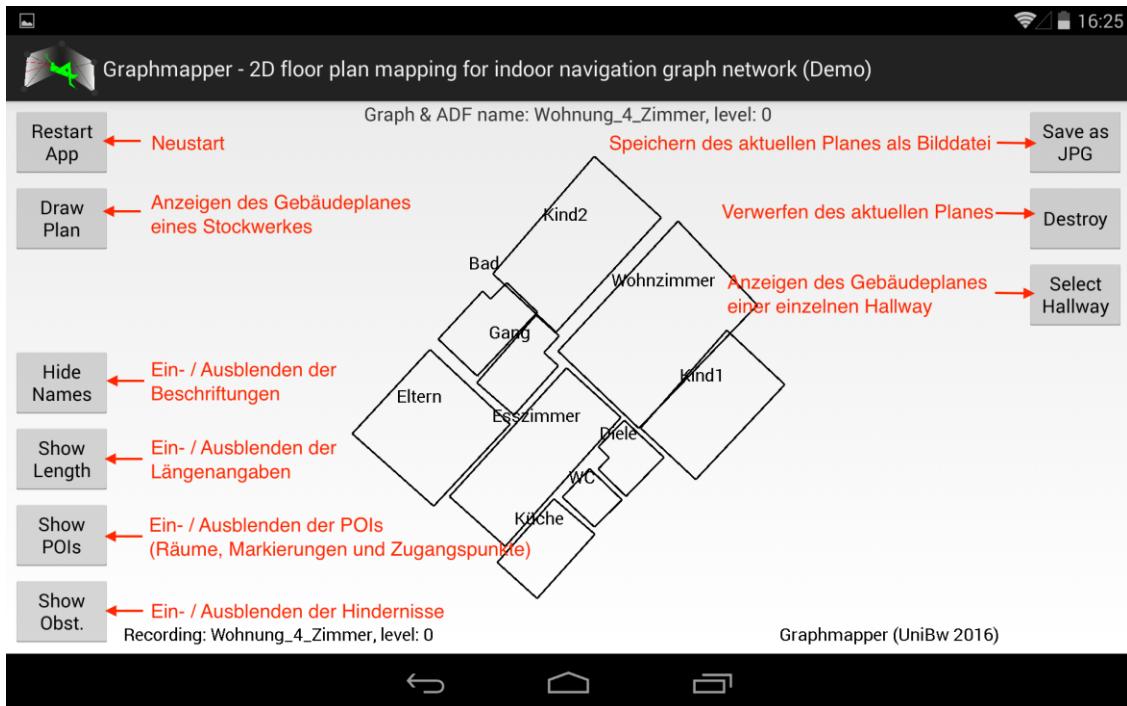


Abbildung 7-14: Kartenansicht der Applikation Graphmapper mit Gebäudeplan eines Stockwerkes

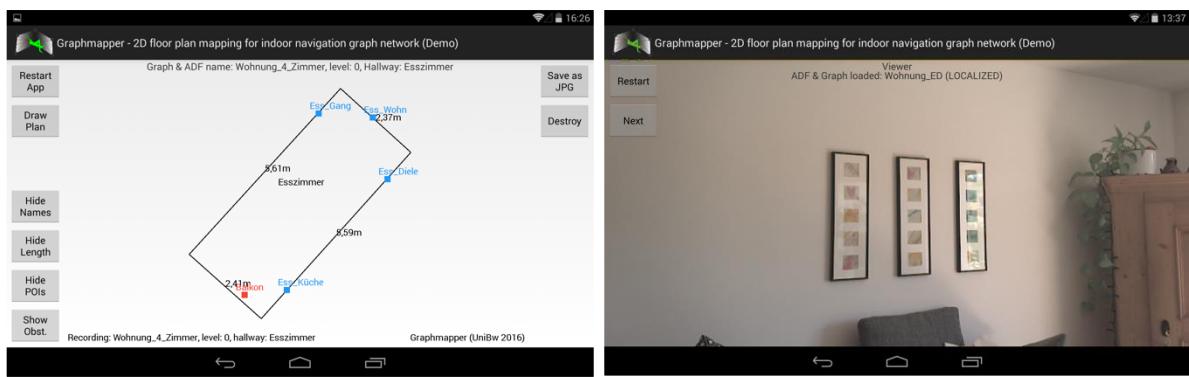


Abbildung 7-15: Links: Kartenansicht der Applikation Graphmapper mit Gebäudeplan der Hallway „Esszimmer“, Rechts: Anzeige der erfolgreichen Relokalisierung im Viewer-Modus

¹¹ Google Project Tango – Tango Graphmapper 1.0 (Demo): https://www.youtube.com/watch?v=QVfo-_gM7gA [Zugriff am: 22.07.2016]

7.2.2 Bewertung der Gebäudepläne

Die Evaluation der von Graphmapper erzeugten Gebäudepläne geschieht anhand zweier Kriterien. Zum einen wird die Genauigkeit der berechneten Längenangaben und zum anderen die Qualität der Grundrisse untersucht. Dabei wird das fünfte und sechste Stockwerk des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München, das längere Korridore, Treppen und einen Aufzug beinhaltet, und eine 4-Zimmer-Wohnung mit zehn verschiedenen Hallways in Erding vermessen.

a) Genauigkeit der Längenangaben

Die Längenangaben der Wandabschnitte der Applikation werden mit Referenzmessungen eines Laser-Entfernungsmessgerätes des Typs DLE 50 von Bosch [80] verglichen, das eine Messgenauigkeit im Millimeterbereich besitzt. Die Referenzpläne der beiden Innenraumumgebungen sind in Abbildung 9-1 und Abbildung 9-2 im Anhang 9.1 zu finden. Dort sind ebenfalls alle erfassten Messdaten in tabellarischer Form aufgelistet. Pro Gebäude gibt es zwei unterschiedliche Messreihen mit je drei Durchläufen an einem gewöhnlichen, sonnigen Sommertag. In der ersten wird jeweils der gesamte Bereich am Stück erfasst. Die Aufnahmen der zweiten Messreihe werden in der Universität nach einem Stockwerk und in der Wohnung nach jedem Raum (Hallway) abgespeichert. Nach erfolgreicher Relokalisierung erfolgt anschließend die Fortsetzung der Aufzeichnung. Für das Universitätsgebäude existiert zudem eine dritte Messreihe, ebenfalls mit drei Durchgängen. Deren Aufnahmen entstehen ohne Unterbrechungen zwischen den Etagen und in Abwesenheit von Tageslicht. Ferner werden alle aus Glas bestehenden Zwischentüren mit einem Papierstück beklebt. Die Startpunkte und Wege durch die Innenraumumgebungen variieren in allen Durchläufen der Messreihen. Tabelle 7-1 zeigt eine Übersicht der durchschnittlichen Abweichung der Messreihen von den Längenangaben der Laserdaten in Prozent und alternativ in Metern pro Strecke bzw. Wandabschnitt. In Abbildung 7-16 sind zudem in einem Diagramm die prozentualen Differenzen jedes Durchlaufs grafisch visualisiert. Sämtliche Berechnungen sind dem Anhang 9.1 zu entnehmen. Die Vorzeichen der Längendifferenzen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Tabelle 7-1: Durchschnittliche Abweichung der Längenangaben von Graphmapper pro Strecke nach drei Durchläufen pro Messreihe in Bezug zu den Werten des Laser-Entfernungsmessgeräts (Angaben in Prozent und in Metern)

Messreihe \ Ort	Universität	Wohnung
1 (ohne Pause)	3,56 % (0,20 m)	2,16 % (0,05 m)
2 (mit Pause)	3,91 % (0,23 m)	2,30 % (0,06 m)
3 (ohne Pause)	3,13 % (0,18 m)	-

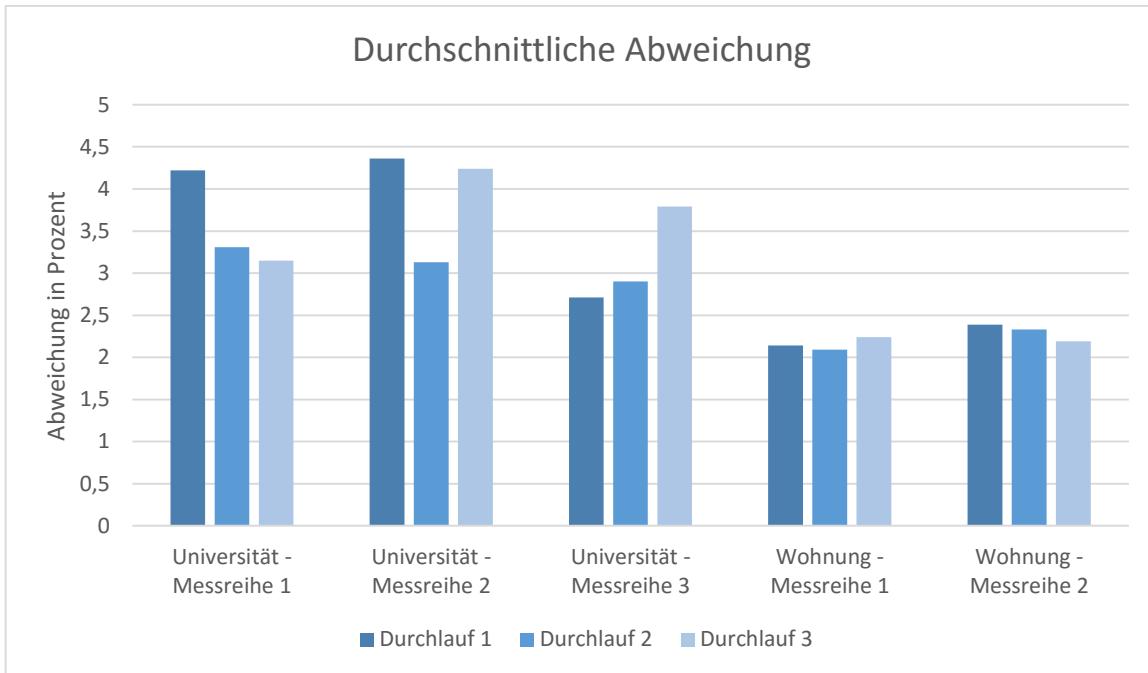


Abbildung 7-16: Durchschnittliche Abweichung der Längenangaben von Graphmapper pro Strecke in Bezug zu den Werten des Laser-Entfernungsmessgeräts pro Durchlauf (Angaben in Prozent)

Die Auffälligkeiten dieser Statistik ergeben sich einerseits aus den großen Abweichungen in den Messgenauigkeiten zwischen beiden erfassten Gebäuden. In den Messreihen 1 und 2 besteht eine deutliche Differenz zwischen den Daten der Universität und der Wohnung. Mögliche Gründe hierfür könnten die langgestreckten Korridore des Universitätsgebäudes darstellen, die zu längeren Wegen bei der Aufzeichnung führen und somit größere Fehler in der Bewegungsverfolgung (Motion Tracking) und Umgebungswiedererkennung (Area Learning) des Tango-Tablets hervorrufen könnten, die auf den Verfahren der Inertialen (Kap. 3.2.3) und Visuellen Odometrie (Kap. 3.2.4) basieren. Außerdem befinden sich in der bewohnten 4-Zimmer-Wohnung deutlich mehr Merkmale, die als Landmarken des Area Learning Konzepts im ADF gespeichert werden können, während die Gänge an der Universität oftmals keine Besonderheiten aufweisen und sich auch untereinander nicht problemlos voneinander unterscheiden lassen. Die Tatsache des durchschnittlichen Längenunterschieds von zwanzig (München) zu fünf (Erding) Zentimetern im Vergleich zu den Laserwerten bestärkt diese Theorie und beschreibt eine weitere Anomalie. Aufgrund der auf Kamera- und Infrarotsystemen basierten Tango-Technologie spielen Lichtverhältnisse ebenfalls eine große Rolle bei der Exaktheit der Resultate. Zum Zeitpunkt der Erfassung der Messreihen 1 und 2 herrschten zwar dieselben äußeren Umstände, allerdings ist die 4-Zimmer-Wohnung in Erding tagsüber weitestgehend vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. Im Gebäude 41/100 der Universität der Bundeswehr München hingegen könnte das hell einstrahlende Sonnenlicht an den Fenstern die Performanz der Applikation beeinflusst haben. Des Weiteren befinden sich in diesem Bauwerk zahlreiche Zwischentüren aus Glas, die sich negativ auf die Qualität der Infrarotprojektion bzw. der Tiefenwahrnehmung auswirken. Deshalb sind diese in einer dritten

Messreihe, die in Abwesenheit von Tageslicht durchgeführt wird, mit einem Papierstück beklebt. Die mittlere prozentuale Abweichung pro Strecke kann so um fast ein halbes Prozent im Vergleich zur ersten Messreihe minimiert werden (Tabelle 7-1). Generell weist die relative Positionsbestimmung des Tablets an beiden Orten also eine gewisse Ungenauigkeit auf. Andererseits sticht ebenso die Differenz in der Genauigkeit zwischen den beiden Aufzeichnungsmodi hervor. Mit Unterbrechung bzw. Zwischenspeicherung und Relokalisierung der Aufnahmen werden deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt als ohne. Dieser Sachverhalt könnte mit Ungenauigkeiten in der Relokalisierung des Tango-Geräts in Bezug auf ein zuvor aufgenommenes ADF begründet werden. Allerdings ist der Unterschied in der Wohnung, trotz neunmaligem Speichern und Laden (zehn Hallways), geringer als an der Universität, in der nur einmalig nach dem zuerst aufgezeichneten Stockwerk eine Pause eingelegt wird. Selbstverständlich könnten auch unbestimmbare Diskrepanzen in den Messungen, wie zum Beispiel ungleichartiges Wackeln des Geräts während der Bewegung oder unterschiedliche Startpunkte und Wege durch das Gebäude, Abweichungen der Messergebnisse hervorgerufen haben. Abbildung 7-16 zeigt ein Balkendiagramm, das die prozentuale Differenz zu den Laserwerten für jeden Durchlauf pro Messreihe visualisiert. Dabei sind eindeutig Schwankungen zwischen den jeweils drei Aufzeichnungsdurchgängen im Universitätsgebäude zu erkennen, während die Messungen im Wohngebäude weitestgehend konstant verlaufen. Insgesamt beträgt die durchschnittliche Abweichung der Applikation Graphmapper bei Zusammenfassung der Ergebnisse sämtlicher Messreihen beider Orte etwa drei Prozent. Die Differenz des besten Durchlaufs beläuft sich auf 2,09 (Erding) und des schlechtesten auf 4,36 (München) Prozent. Bei Vergleichen der Ergebnisse mit der Veröffentlichung von Gülch [81], der in dieser die Messgenauigkeit von Objekten des Tango-Entwicklungstablets anhand der vorinstallierten Anwendung „MeasureIt“ von Google untersucht und eine durchschnittliche Längendiskrepanz von etwa 5,5 Prozent erreicht, kann ein durchweg positives Fazit gezogen werden, wenngleich die äußereren Umstände (z.B. Licht) die Resultate enorm beeinflussen. Auch sollte die mit der Dauer der Aufnahme steigende Speicherzeit und Größe des ADFs nicht unerwähnt bleiben. Im schlechtesten Fall dauert das Sichern der Datei nach Aufzeichnen des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München etwa ein bis zwei Minuten mit einer resultierenden Dateigröße von maximal 50 Megabyte.

b) Qualität

Neben der quantitativen Auswertung der Genauigkeit der berechneten Längenangaben wird nachfolgend die Qualität der erzeugten Gebäudepläne bewertet. Nachstehend werden die von Graphmapper angefertigten Grundrisse des fünften (Abbildung 7-17) und sechsten (Abbildung 7-18) Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München mit ihren Referenzplänen gegenübergestellt. Des Weiteren ist der Plan einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding (Abbildung 7-19) angehängt. Teilweise überlappen einzelne Hallways und die Längenungenauigkeiten sind zu erkennen. Insgesamt können die Pläne von Graphmapper jedoch

qualitativ überzeugen und erfüllen die in Indoornavigationsanwendungen erforderliche Genauigkeit von etwa einem Meter (Kap. 2.3). Eine Navigation auf Basis der erzeugten Pläne ist somit möglich.

5. Stockwerk

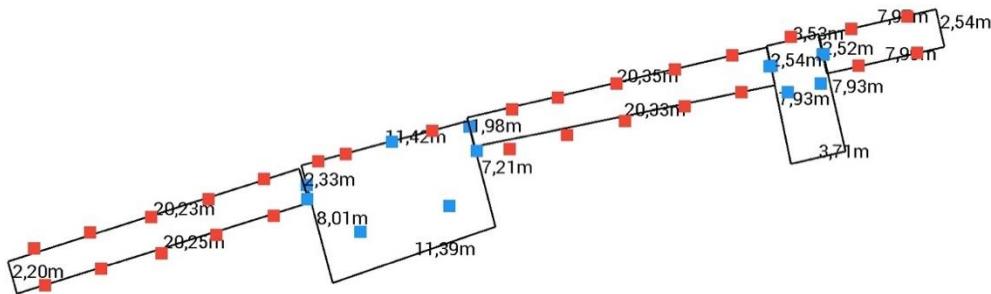
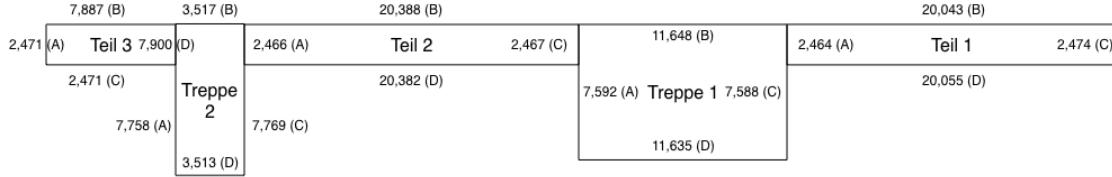


Abbildung 7-17: Oben: Referenzplan des fünften Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München, Unten: Von Graphmapper erzeugter Plan mit POIs

6. Stockwerk

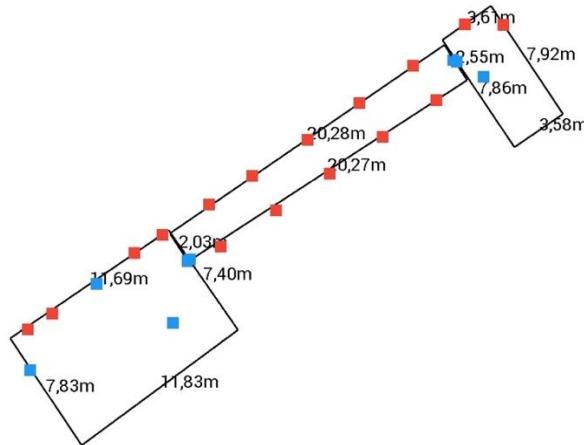
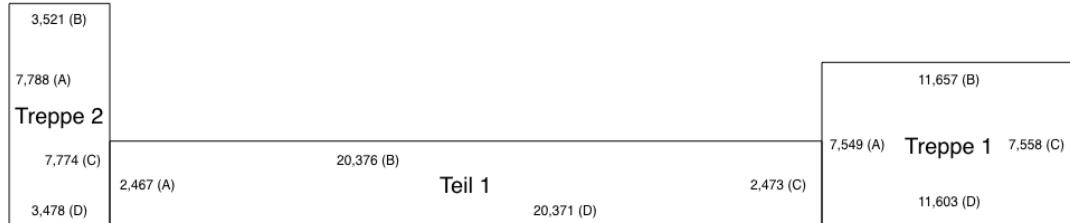


Abbildung 7-18: Oben: Referenzplan des sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München, Unten: Von Graphmapper erzeugter Plan mit POIs

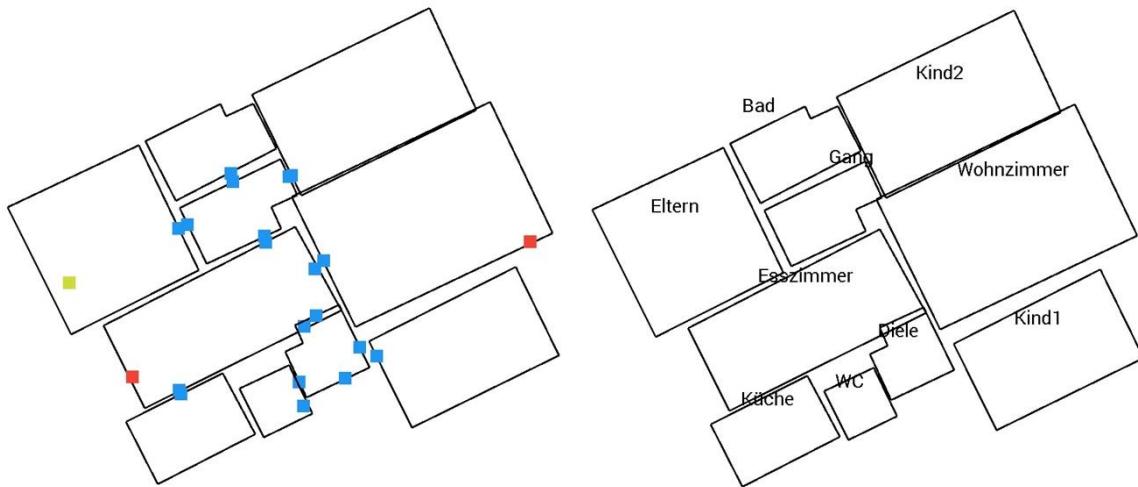


Abbildung 7-19: Links: Von Graphmapper erzeugter Plan mit POIs, Rechts: Von Graphmapper erzeugter Plan mit Beschriftungen der Hallways

7.2.3 Verifikation des Indoornavigationsgraphen

Abgesehen von den Gebäudeplänen erzeugt die Applikation Graphmapper einen Indoornavigationsgraphen nach dem obig beschriebenen Modell (Kap. 7.1.2). Da bisher kein einheitliches Datenmodell zum Modellieren, Speichern und Austauschen von Graphen in der Indoornavigation existiert, werden die graphischen Strukturen im JSON-Format (engl. JavaScript Object Notation) gesichert. Dieses lässt sich nahtlos in die bestehende Datenbankinfrastruktur des Local Area Guides der Universität der Bundeswehr München integrieren und bietet zudem die Möglichkeit der einfachen Konvertierung in ein anderes Datenmodell (z.B. IndoorGML), sobald ein einheitliches Standardformat abzusehen ist. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Verifikation der erzeugten graphischen Repräsentationen der Innenraumumgebungen. Die Kontrolle der Graphen auf deren Richtigkeit gestaltet sich ohne ein Softwaretool, das die Netzwerke entsprechend automatisiert visualisiert, als äußerst mühsame Aufgabe, da die JSON-Dateien manuell untersucht werden müssen. Zur besseren Übersicht wird zusätzlich beim Speichern einer Aufzeichnung eine Textdatei erzeugt, in der sämtliche Hallways der Aufnahme und deren Verbindungen zueinander aufgelistet sind.

Die Verknüpfungen der Gänge des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München sind in einer derartigen Datei in Abbildung 7-20 aufgelistet, wobei im Anhang 9.2.1 der vollständige Originalgraph im JSON-Datenformat zu finden ist. Die von Graphmapper erschaffenen graphischen Repräsentationen des Universitätsgebäudes sind korrekt und stehen mit den gewünschten Ergebnissen (Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2) in Einklang.

Abbildung 7-22 stellt den, von Graphmapper erzeugten, Indoornavigationsgraphen einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding dar. Im Anhang 9.2.2 ist der ursprüngliche Graph dieser Innenraumumgebung im JSON-Format abgedruckt. Die Beziehungen zwischen den einzelnen Hallways sind der Visualisierung oder der Textdatei in Abbildung 7-21 zu entnehmen. Neben

den Hallways (Knoten) und Entrypoints (Kanten) enthält der Graph ein Markierungsobjekt („Fenster“) und zwei Instanzen der Room-Struktur („Balkon“ und „Terrasse“). Diese repräsentieren Bereiche, in denen keine weitere Indoornavigation erforderlich ist. Das von der Anwendung erzeugte Netzwerk stimmt mit dem erwarteten (Abbildung 7-3) überein.

```
Hallway "5_Teil3" (id: 0, level: 5) connected to: id: 1
Hallway "5_Treppe2" (id: 1, level: 5) connected to: id: 7; id: 2; id: 0
Hallway "5_Teil2" (id: 2, level: 5) connected to: id: 1; id: 3
Hallway "5_Treppe1" (id: 3, level: 5) connected to: id: 2; id: 5; id: 4
Hallway "5_Teill1" (id: 4, level: 5) connected to: id: 3
Hallway "6_Treppe1" (id: 5, level: 6) connected to: id: 3; id: 6
Hallway "6_Teill1" (id: 6, level: 6) connected to: id: 5; id: 7
Hallway "6_Treppe2" (id: 7, level: 6) connected to: id: 6; id: 1
```

Abbildung 7-20: Hallways und deren verbundene Entrypoints des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München

```
Hallway "Kind2" (id: 0, level: 0) connected to: id: 1
Hallway "Gang" (id: 1, level: 0) connected to: id: 3; id: 0; id: 5; id: 2
Hallway "Eltern" (id: 2, level: 0) connected to: id: 1
Hallway "Esszimmer" (id: 3, level: 0) connected to: id: 7; id: 1; id: 6; id: 4
Hallway "Küche" (id: 4, level: 0) connected to: id: 3
Hallway "Bad" (id: 5, level: 0) connected to: id: 1
Hallway "Wohnzimmer" (id: 6, level: 0) connected to: id: 3
Hallway "Diele" (id: 7, level: 0) connected to: id: 8; id: 3; id: 9;
Hallway "Kind1" (id: 8, level: 0) connected to: id: 7
Hallway "WC" (id: 9, level: 0) connected to: id: 7
```

Abbildung 7-21: Hallways und deren verbundene Entrypoints einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding

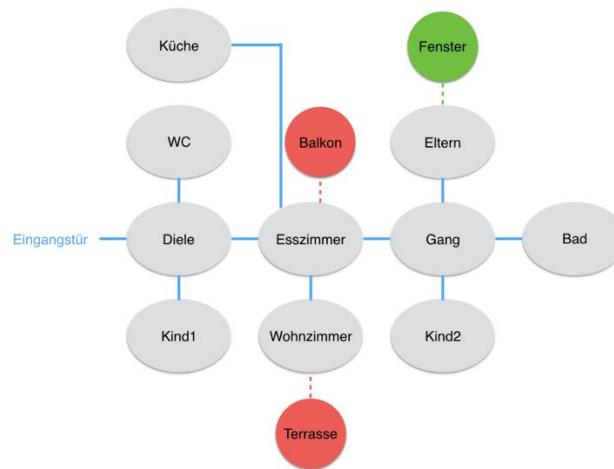


Abbildung 7-22: Erzeugter Indoornavigationsgraph einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding

7.3 Integration in den Local Area Guide

Nach der Erläuterung des Konzepts und der Evaluation der entwickelten Applikation im vorliegenden Kapitel wird abschließend die Entstehung eines Indoornavigationssystems zur Integration in den bestehenden Local Area Guide der Universität der Bundeswehr München diskutiert. Die Erweiterung des Systems auf die Navigation innerhalb von Gebäuden wäre ein Punkt, der in zukünftigen Projekten bearbeitet werden könnte. Nach dem Sammeln von Kartenmaterial bzw. dem Kartieren sämtlicher Universitätsgebäude mit Graphmapper ist das Festlegen auf eine Technologie zur Lokalisierung (Kap. 3.2) in den Innenraumumgebungen erforderlich. Hierfür bietet sich u. a. WLAN (Kap. 3.2.2a)) an, da die dafür benötigte Hardwarestruktur weitestgehend auf dem Campusgelände vorhanden ist, oder die Verwendung von QR- bzw. Barcodes. Diese Technik wäre kostengünstig und einfach zu installieren. Die Positionen der Landmarken könnten beispielsweise mit dem Markierungselement (Marker) von Graphmapper bei der Kartografie abgespeichert werden. Eine Navigationsanwendung basierend auf der Tango-Technologie von Google wäre nach derzeitigem Stand noch nicht zu empfehlen, da erst wenige Geräte diese Technik beherrschen. Die Indoornavigation auf dem Campus würde in erster Linie Besucher am Tag der offenen Tür bzw. neue Mitglieder der Universität ansprechen. Da die Anzahl der verfügbaren Tango-Tablets limitiert ist, wäre die Bereitstellung der Navigation mit gewöhnlichen mobilen Endgeräten der Benutzer am sinnvollsten. Außerdem wäre bei Verwendung der Tango-Technologie zur Navigation stets eine aufrechte Führung des Gerätes durch die Gebäude notwendig, damit die Sensoren die Umgebung zur relativen Positionsbestimmung und Tiefenwahrnehmung erfassen könnten. Dies würde einen anderen, als den bisher gewohnten, Umgang mit mobilen Endgeräten erfordern. Ein weiterer Aspekt, den es zu beachten gilt, ist die Integration des Indoornavigationssystems in den bestehenden Local Area Guide zur Wegfindung und -planung außerhalb von Gebäuden. Ein nahtloses Umschalten zwischen Indoor- und Outdoornavigation an den Zugangspunkten wäre hierbei wichtig. Auch wenn im Innenbereich ein unterschiedliches Datenformat (z.B. IndoorGML) als im Außenbereich (OpenStreetMap) gewählt wird, könnte eine optimale Verknüpfung beider Elemente diese Herausforderung bewältigen. Durch die einfache Gestaltung des bisherigen graphischen Modells von Graphmapper und das Sichern der Netzwerke im JSON-Format, wäre das Konvertieren in ein anderes Datenformat, wenn es einen einheitlichen Standard gibt, mit nicht allzu großem Aufwand verbunden. Allerdings könnte auch die gegenwärtige Struktur in den Local Area Guide integriert werden, da diese bereits geometrische, semantische und topologische Informationen über die Umgebung beinhaltet. Ein derartiges, universales Navigationssystem würde zudem den aktuellen Trend der Forschung widerspiegeln.

8 Zusammenfassung

Zu Beginn bietet diese Arbeit einen Überblick der aktuellen Entwicklungen sämtlicher Kernkomponenten eines Indoornavigationssystems (Abbildung 2-2) und erläutert deren Möglichkeiten zur Navigation innerhalb von Gebäuden mit mobilen Endgeräten. Anschließend wird mit dem Project Tango eine moderne Technik vorgestellt und die Entwicklung einer Kartierungsapplikation zum Erzeugen von zweidimensionalen Gebäudeplänen und Indoornavigationsgraphen beschrieben. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Ausarbeitung zusammengefasst und bewertet, diverse Verbesserungen bzw. Erweiterungen von Graphmapper erörtert und auf zukünftige Entwicklungen geblickt.

8.1 Fazit

Zur Lokalisierung in Innenbereichen gibt es zahlreiche verschiedene Möglichkeiten, von denen in dieser Ausarbeitung nur wenige, wichtige ausgeführt werden. Neben Unterscheidungsmerkmalen in der Genauigkeit der Positionsbestimmung ist vor allem der Bedarf einer zusätzlichen, externen Hardwarestruktur (z.B. Bluetooth-Beacons) ein entscheidendes Kriterium bei der Wahl einer Technologie, da diese in der Regel sehr kostspielig anzuschaffen ist. Systeme, die ohne derartige Installationen (z.B. Project Tango) auskommen, sind klar im Vorteil, falls das Ziel verfolgt wird, die Indoornavigation global bzw. nicht nur in einem Gebäude anzubieten. Eine einheitliche Lösung ist derzeit nicht absehbar. Auch im Gebiet Datenbank bzw. Netzwerk bedarf es noch weiterer Forschung. Für die weltweite Verbreitung der Indoornavigation wäre ein Standardformat zum Modellieren, Speichern und Austauschen von geometrischen, semantischen und topologischen Informationen über Innenraumumgebungen notwendig, da sich Insellösungen zumeist auf einen oder wenige Anwendungsfälle und Gebäude beschränken. Die Routingkomponente hingegen weist die größten Gemeinsamkeiten mit der Outdoornavigation auf und ein Algorithmus wäre mit einem entsprechenden Datenmodell, das Routingfunktionen zur Verfügung stellt, einsatzbereit.

Mit dem Project Tango entwickelt Google seit 2014 eine neuartige Technologie für mobile Endgeräte, deren Position ohne zusätzliche Hardware bestimmt werden kann. Die Technik zeigt, dass die erforderliche Rechenleistung zur Anwendung von Bewegungsverfolgung (Motion Tracking), Umgebungswiedererkennung (Area Learning) und Tiefenwahrnehmung (Depth Perception) durchaus von mobilen Endgeräten mit sehr guten Ergebnissen zu bewältigen ist. Mit der Tango-Kartierungsapplikation Graphmapper können Indoornavigationsgraphen der Umgebung und zweidimensionale Pläne der Innenbereiche von Gebäuden mit einer Genauigkeit von durchschnittlich 97 Prozent erzeugt werden. Die Resultate werden enorm von den bestehenden Lichtverhältnissen beeinflusst und transparente Objekte eignen sich schlecht

zur Platzierung von AR-Objekten. Außerdem sollte der Abstand des Tablets zum Ziel am besten zwischen einem halben und vier Metern betragen. Bei einer Entfernung von über zehn Metern stehen keinerlei Tiefeninformationen zur Verfügung. Die Qualität der Tiefenwahrnehmung stellt, neben Abweichungen in der relativen Positionsbestimmung des Gerätes durch Bewegungsverfolgung und Umgebungswiedererkennung, den kritischen Punkt in der Genauigkeit dar. Zum Erreichen von Millimeterabweichungen bedarf es professioneller Hardware zur Vermessung. Mit der entstandenen Applikation können die Gebäude der Universität der Bundeswehr München, mit einer für die Indoornavigation ausreichenden Genauigkeit, kartiert und ein Indoornavigationssystem zur Integration in den Local Area Guide entwickelt werden, um auf dem Campus, neben der Outdoornavigation, auch Navigation in Innenbereichen anbieten zu können.

8.2 Ausblick

Um die Daten von Graphmapper in einem Indoornavigationssystem bestmöglich verarbeiten zu können, wäre es sinnvoll, ein einheitliches Datenformat zu finden. Für das aussichtsreichste Datenformat IndoorGML (Kap. 4.2.4) muss zunächst noch mehr Software zur Verfügung gestellt werden, um die Verwendung benutzerfreundlich zu gestalten. Derzeit mangelt es noch an Beschreibungen und Beispielen zum korrekten Anlegen von Dateien und vor allem an einem Tool zum Betrachten bzw. Verifizieren erzeugter IndoorGML-Strukturen. An der Universität Busan (engl. Pusan National University) in Südkorea entsteht derzeit ein Softwaretool [82] zur graphischen Visualisierung und Inspizierung von Dateien dieses Formates. Selbstverständlich könnte sich auch ein neuartiges, bisher unbekanntes, Datenformat durchsetzen. Die vielversprechende Lösung IndoorGML hätte jedoch das Potential sich zu einer globalen, standardisierten Lösung zu entwickeln.

Die Ungenauigkeiten der von Graphmapper erzeugten Gebäudepläne (Kap. 7.2.2) könnten einerseits durch eine Adaption der Berechnungsverfahren der Eckpunkte aus den Wandmessungen (Kap. 7.1.3c)) minimiert werden. Anstatt des Algorithmus zur Schnittpunktberechnung von Ebenen existieren in der Forschung bereits verschiedene Ansätze zur automatisierten Wand- und Eckenerkennung mit dem Tango-Tablet [83], die die Exaktheit der Ergebnisse verbessern könnten. Andererseits versucht Google durch fortwährende Updates der Tango-Bibliotheken und Bereitstellung neuer Funktionen die Zuverlässigkeit des Systems und der Konzepte (Motion Tracking, Area Learning und Depth Perception) zu erhöhen, deren Ungenauigkeiten einen großen Anteil an den Abweichungen der Messergebnisse besitzen. So könnte die Performanz der Augmented-Reality-Wandmessungen durch die Implementierung der, auf der Entwicklerkonferenz Google I/O 2016 vorgestellten, „Drift Correction“-Funktion [84] gesteigert werden, indem die Position des virtuellen Objektes bei Wiedererkennen des

platzierten Ortes stetig aktualisiert wird. Jedoch kann diese Funktionalität zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Ausarbeitung nicht in Kombination mit Area Learning genutzt werden, weshalb eine Erweiterung der Anwendung bisher nicht möglich ist.

Mit dem Lenovo Phab 2 Pro kommt im September 2016 das erste kommerzielle Tango-Smartphone auf den Markt. Sollte sich diese Technologie etablieren und von den Konsumenten angenommen werden, wird es nicht lange dauern, bis weitere Hersteller vergleichbare Lösungen anbieten. Derzeit häufen sich die Gerüchte, dass in den nächsten Smartphone-Generationen von Apple [85, 86] und Samsung [87] Sensorik zur Erfassung von dreidimensionalen Tiefeninformationen verbaut sein wird. Sobald dies der Fall sein sollte, könnte die Tango-Technik auf nahezu jedem mobilen Endgerät angewendet werden, da IMUs und Kamerasysteme bereits in den aktuellen Geräten vorhanden sind. Des Weiteren kündigt das Unternehmen auf der offiziellen Tango-Webseite [66] für dieses Jahr ein Indoornavigationssystem an. Allerdings gibt es hierzu zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit keine weiteren Informationen. Jedoch ist eine Lokalisierung in Innenbereichen mittels geladener ADFs durch eine Integration des Project Tango in die bestehende Applikation Google Maps gut vorstellbar. Kartenmaterialien der Innenbereiche diverser Gebäude stehen derzeit schon zur Verfügung (Abbildung 2-1).

8.3 Schlusswort

Die Mehrzahl der derzeit existierenden Indoornavigationssysteme verwenden eigenständige Techniken zur Lokalisierung, individuelle Datenmodelle und sind auf ein oder wenige Gebäude begrenzt. Für eine einheitliche Technologie, vergleichbar mit GPS in der Outdoornavigation, bedarf es ein Pionierunternehmen, das einen Standard formt und Insellösungen überflüssig macht. Eine globale, universale Navigationsanwendung für mobile Endgeräte mit automatisiertem Umschalten zwischen Innen- und Außenbereichen wäre wünschenswert. Google hätte zum einen den Einfluss auf dem Markt und mit dem Project Tango das Potential dies zu ermöglichen. Bleibt abzuwarten, ob wir uns in Zukunft nicht nur auf dem Mond, sondern auch in Einkaufszentren, Flughäfen, Museen oder anderen großen Gebäudekomplexen zurechtfinden und Colin Ellard [1] widersprechen können.

9 Anhang

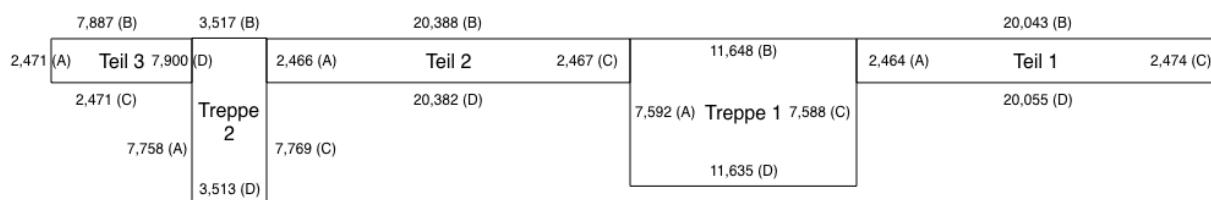
9.1 Referenzmessungen

Sämtliche Referenzmessungen sind durch ein Bosch DLE 50 Laser-Entfernungsmessgerät [80] entstanden.

9.1.1 Beispielgebäude 1: Universität der Bundeswehr München

Als erstes Beispielgebäude wurde das fünfte und sechste Stockwerk des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München ausgewählt.

5. Stockwerk



6. Stockwerk

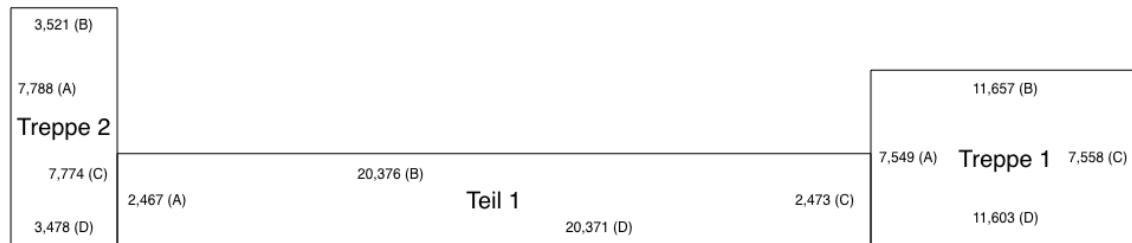


Abbildung 9-1: Referenzplan des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München (Zeichnung nicht maßstabsgetreu)

a) Messreihe 1 (ohne Pause)

Tabelle 9-1: Messreihe 1 (ohne Unterbrechung) – Drei vollständige Durchläufe des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München und durchschnittliche Abweichung von den Laserwerten in Prozent und in Meter

Strecke	Laser [m]	Versuch 1 [m]	Versuch 2 [m]	Versuch 3 [m]	Durchschn. Abweichung [%]	Durchschn. Abweichung [m]
5 – Teil 1 A	2,464	2,27	2,61	2,48	4,82	0,12
5 – Teil 1 B	20,043	20,36	19,56	20,01	1,39	0,28

<i>5 – Teil 1 C</i>	2,473	2,67	2,54	2,26	6,43	0,16
<i>5 – Teil 1 D</i>	20,055	20,34	19,19	19,96	2,07	0,42
<i>5 – Treppe 1 A</i>	7,592	7,50	7,30	7,69	2,12	0,16
<i>5 – Treppe 1 B</i>	11,648	11,86	11,79	11,61	1,12	0,13
<i>5 – Treppe 1 C</i>	7,588	7,76	7,61	7,30	2,12	0,16
<i>5 – Treppe 1 D</i>	11,635	11,38	11,35	11,35	2,36	0,28
<i>5 – Teil 2 A</i>	2,466	2,05	1,90	2,15	17,55	0,43
<i>5 – Teil 2 B</i>	20,388	20,60	20,64	20,54	1,01	0,21
<i>5 – Teil 2 C</i>	2,467	2,39	2,56	2,23	5,50	0,14
<i>5 – Teil 2 D</i>	20,382	20,55	20,62	20,54	0,92	0,19
<i>5 – Treppe 2 A</i>	7,758	8,06	8,04	8,16	4,24	0,33
<i>5 – Treppe 2 B</i>	3,517	3,81	3,63	3,65	5,11	0,18
<i>5 – Treppe 2 C</i>	7,769	8,11	8,04	8,12	4,13	0,32
<i>5 – Treppe 2 D</i>	3,513	3,51	3,52	3,59	0,83	0,03
<i>5 – Teil 3 A</i>	2,471	2,61	2,52	2,64	4,82	0,12
<i>5 – Teil 3 B</i>	7,887	8,20	8,10	8,26	3,80	0,30
<i>5 – Teil 3 C</i>	2,471	2,36	2,31	2,36	5,17	0,13
<i>5 – Teil 3 D</i>	7,900	8,05	7,96	8,1	1,73	0,14
<i>6 – Treppe 1 A</i>	7,549	6,88	7,65	7,49	3,66	0,28
<i>6 – Treppe 1 B</i>	11,657	12,06	11,79	11,7	1,66	0,19
<i>6 – Treppe 1 C</i>	7,588	8,06	7,81	7,8	3,98	0,30
<i>6 – Treppe 1 D</i>	11,603	11,59	11,6	11,46	0,46	0,05
<i>6 – Teil 1 A</i>	2,467	2,42	2,22	2,52	4,69	0,12
<i>6 – Teil 1 B</i>	20,376	20,54	20,23	20,14	0,89	0,18
<i>6 – Teil 1 C</i>	2,473	2,03	2,42	2,41	7,53	0,19
<i>6 – Teil 1 D</i>	20,371	20,64	20,20	20,12	1,13	0,23
<i>6 – Treppe 2 A</i>	7,788	8,15	8,08	7,86	3,11	0,24
<i>6 – Treppe 2 B</i>	3,521	3,64	3,56	3,82	4,33	0,15
<i>6 – Treppe 2 C</i>	7,774	8,07	8,02	7,98	3,21	0,25
<i>6 – Treppe 2 D</i>	3,478	3,54	3,62	3,46	2,13	0,07
Gesamt	4,22	3,31	3,15	3,56	0,20	

b) Messreihe 2 (mit Pause)

Tabelle 9-2: *Messreihe 2 (mit Unterbrechung) – Drei Durchläufe des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München mit Zwischenspeichern nach dem ersten Stockwerk und durchschnittliche Abweichung von den Laserwerten in Prozent und in Meter*

Strecke	Laser [m]	Versuch 1 [m]	Versuch 2 [m]	Versuch 3 [m]	Durchschn. Abweichung [%]	Durchschn. Abweichung [m]
5 – Teil 1 A	2,464	2,74	2,67	1,79	15,64	0,39
5 – Teil 1 B	20,043	20,12	20,15	20,02	0,34	0,07
5 – Teil 1 C	2,473	2,25	2,48	2,61	4,95	0,12
5 – Teil 1 D	20,055	20,16	20,11	19,95	0,44	0,09
5 – Treppe 1 A	7,592	8,49	7,51	7,72	4,86	0,37
5 – Treppe 1 B	11,648	11,51	11,66	12,02	1,49	0,17
5 – Treppe 1 C	7,588	7,85	7,74	8,36	5,21	0,40
5 – Treppe 1 D	11,635	11,74	11,6	11,76	0,76	0,09
5 – Teil 2 A	2,466	2,54	2,62	2,56	4,35	0,11
5 – Teil 2 B	20,388	20,58	20,12	20,29	0,91	0,19
5 – Teil 2 C	2,467	2,40	2,28	1,87	11,50	0,28
5 – Teil 2 D	20,382	20,56	20,13	20,30	0,84	0,17
5 – Treppe 2 A	7,758	8,09	8,15	8,18	4,92	0,38
5 – Treppe 2 B	3,517	3,59	3,75	3,68	4,45	0,16
5 – Treppe 2 C	7,769	8,13	8,17	8,22	5,20	0,40
5 – Treppe 2 D	3,513	3,58	3,55	3,50	1,11	0,04
5 – Teil 3 A	2,471	2,51	2,62	2,44	2,95	0,07
5 – Teil 3 B	7,887	7,98	8,00	8,14	1,94	0,15
5 – Teil 3 C	2,471	2,59	2,62	2,58	5,09	0,13
5 – Teil 3 D	7,900	8,02	8,02	8,10	1,86	0,15
6 – Treppe 1 A	7,549	7,51	7,08	7,65	2,69	0,20
6 – Treppe 1 B	11,657	12,16	11,96	12,10	3,57	0,42
6 – Treppe 1 C	7,588	10,47	7,92	7,93	15,62	1,19
6 – Treppe 1 D	11,603	11,49	11,85	11,83	1,69	0,20
6 – Teil 1 A	2,467	2,33	2,64	2,53	5,04	0,12
6 – Teil 1 B	20,376	19,95	20,33	20,59	1,12	0,23
6 – Teil 1 C	2,473	2,54	2,25	2,42	4,62	0,11
6 – Teil 1 D	20,371	19,90	20,25	20,6	1,34	0,27
6 – Treppe 2 A	7,788	8,15	7,81	7,88	2,04	0,16
6 – Treppe 2 B	3,521	3,69	3,50	3,54	1,98	0,07
6 – Treppe 2 C	7,774	8,12	7,88	7,95	2,69	0,21

<i>6 – Treppe 2 D</i>	3,478	3,52	3,60	3,72	3,89	0,14
Gesamt	4,36	3,13	4,24	3,91	0,23	

c) Messreihe 3 (ohne Pause)

Tabelle 9-3: *Messreihe 3 (ohne Unterbrechung) – Drei vollständige Durchläufe des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München und durchschnittliche Abweichung von den Laserwerten in Prozent und in Meter (Aufnahmen ohne Tageslicht und mit abgeklebten Glastüren)*

Strecke	Laser [m]	Versuch 1 [m]	Versuch 2 [m]	Versuch 3 [m]	Durchschn. Abweichung [%]	Durchschn. Abweichung [m]
<i>5 – Teil 1 A</i>	2,464	2,18	2,30	1,94	13,15	0,32
<i>5 – Teil 1 B</i>	20,043	19,65	19,89	19,97	1,03	0,21
<i>5 – Teil 1 C</i>	2,473	2,26	2,24	2,60	7,72	0,19
<i>5 – Teil 1 D</i>	20,055	19,69	19,95	19,94	0,97	0,20
<i>5 – Treppe 1 A</i>	7,592	7,52	7,44	7,71	1,50	0,11
<i>5 – Treppe 1 B</i>	11,648	12,04	11,96	11,76	2,34	0,27
<i>5 – Treppe 1 C</i>	7,588	7,85	7,81	7,95	3,72	0,28
<i>5 – Treppe 1 D</i>	11,635	11,67	11,78	11,65	0,56	0,07
<i>5 – Teil 2 A</i>	2,466	2,37	2,51	2,53	2,76	0,07
<i>5 – Teil 2 B</i>	20,388	20,59	20,45	20,31	0,56	0,11
<i>5 – Teil 2 C</i>	2,467	2,51	2,37	2,37	3,20	0,08
<i>5 – Teil 2 D</i>	20,382	20,60	20,45	20,31	0,59	0,12
<i>5 – Treppe 2 A</i>	7,758	7,85	7,93	8,15	2,82	0,22
<i>5 – Treppe 2 B</i>	3,517	3,72	3,73	3,61	4,82	0,17
<i>5 – Treppe 2 C</i>	7,769	7,91	7,92	8,09	2,63	0,20
<i>5 – Treppe 2 D</i>	3,513	3,53	3,57	3,58	1,34	0,05
<i>5 – Teil 3 A</i>	2,471	2,50	2,57	2,55	2,79	0,07
<i>5 – Teil 3 B</i>	7,887	8,18	8,12	8,20	3,55	0,28
<i>5 – Teil 3 C</i>	2,471	2,49	2,50	2,48	0,77	0,02
<i>5 – Teil 3 D</i>	7,900	8,08	8,00	8,11	2,07	0,16
<i>6 – Treppe 1 A</i>	7,549	7,92	7,28	7,89	4,33	0,33
<i>6 – Treppe 1 B</i>	11,657	11,47	12,10	11,58	2,02	0,24
<i>6 – Treppe 1 C</i>	7,588	7,52	7,90	9,07	8,18	0,62
<i>6 – Treppe 1 D</i>	11,603	11,38	11,86	11,65	1,51	0,18
<i>6 – Teil 1 A</i>	2,467	2,43	2,77	2,89	10,31	0,25
<i>6 – Teil 1 B</i>	20,376	20,56	20,39	20,41	0,38	0,08
<i>6 – Teil 1 C</i>	2,473	2,30	2,55	2,50	3,73	0,09
<i>6 – Teil 1 D</i>	20,371	20,56	20,49	20,33	0,57	0,12

6 – Treppe 2 A	7,788	7,83	7,91	8,07	1,91	0,15
6 – Treppe 2 B	3,521	3,61	3,70	3,65	3,76	0,13
6 – Treppe 2 C	7,774	7,95	7,92	7,94	2,09	0,16
6 – Treppe 2 D	3,478	3,65	3,50	3,55	2,55	0,09
Gesamt		2,71	2,90	3,79	3,13	0,18

9.1.2 Beispielgebäude 2: 4-Zimmer-Wohnung in Erding

Als zweites Beispielgebäude wurde eine 4-Zimmer-Wohnung in Erding ausgewählt.

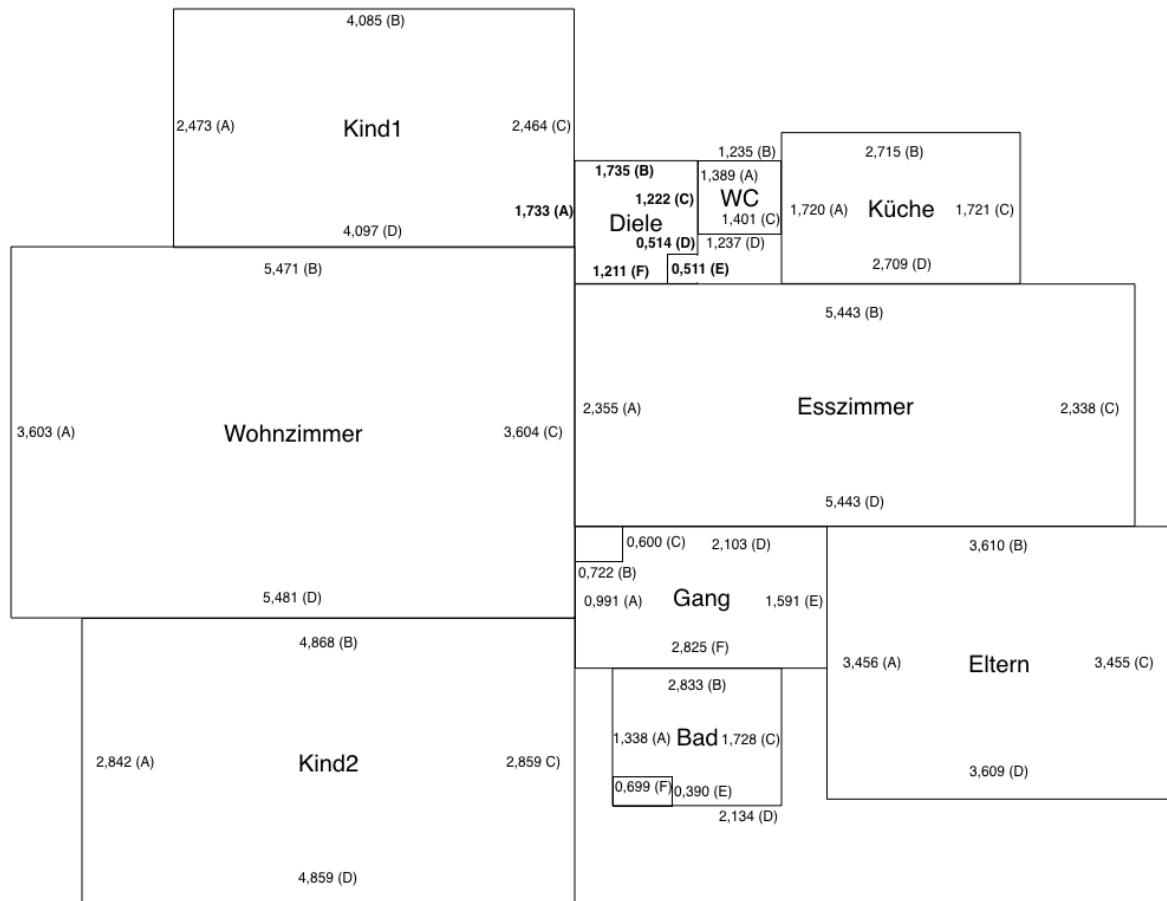


Abbildung 9-2: Referenzplan einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding

a) Messreihe 1 (ohne Pause)

Tabelle 9-4: Messreihe 1 (ohne Unterbrechung) – Drei vollständige Durchläufe einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding und durchschnittliche Abweichung von den Laserwerten in Prozent und in Meter

Strecke	Laser [m]	Versuch 1 [m]	Versuch 2 [m]	Versuch 3 [m]	Durchschn. Abweichung [%]	Durchschn. Abweichung [m]
Kind1 A	2,473	2,51	2,48	2,52	1,23	0,03
Kind1 B	4,085	4,18	4,21	4,15	2,33	0,10

<i>Kind1 C</i>	2,464	2,45	2,52	2,47	1,03	0,03
<i>Kind1 D</i>	4,097	4,19	4,26	4,17	2,68	0,11
<i>Wohnzimmer A</i>	3,603	3,69	3,68	3,76	2,97	0,11
<i>Wohnzimmer B</i>	5,471	5,53	5,62	5,59	1,99	0,11
<i>Wohnzimmer C</i>	3,604	3,66	3,66	3,62	1,18	0,04
<i>Wohnzimmer D</i>	5,481	5,54	5,68	5,72	3,02	0,17
<i>Kind2 A</i>	2,842	2,90	2,90	2,92	2,28	0,06
<i>Kind2 B</i>	4,868	5,03	5,03	5,08	3,67	0,18
<i>Kind2 C</i>	2,859	2,89	2,84	2,87	0,71	0,02
<i>Kind2 D</i>	4,859	5,01	4,98	5,00	2,83	0,14
<i>Diele A</i>	1,733	1,76	1,73	1,74	0,71	0,01
<i>Diele B</i>	1,735	1,76	1,74	1,76	1,06	0,02
<i>Diele C</i>	1,222	1,25	1,23	1,24	1,47	0,02
<i>Diele D</i>	0,514	0,50	0,50	0,49	3,37	0,02
<i>Diele E</i>	0,511	0,50	0,51	0,49	2,15	0,01
<i>Diele F</i>	1,221	1,23	1,23	1,23	0,74	0,01
<i>Esszimmer A</i>	2,355	2,41	2,39	2,35	1,34	0,03
<i>Esszimmer B</i>	5,443	5,51	5,50	5,53	1,29	0,07
<i>Esszimmer C</i>	2,338	2,39	2,46	2,41	3,51	0,08
<i>Esszimmer D</i>	5,443	5,50	5,48	5,52	1,05	0,06
<i>Gang A</i>	0,991	1,00	1,08	1,01	3,93	0,04
<i>Gang B</i>	0,722	0,74	0,73	0,75	2,49	0,02
<i>Gang C</i>	0,600	0,64	0,61	0,61	3,33	0,02
<i>Gang D</i>	2,103	2,16	2,13	2,11	1,44	0,03
<i>Gang E</i>	1,591	1,66	1,62	1,56	2,70	0,04
<i>Gang F</i>	2,825	2,92	2,88	2,86	2,18	0,06
<i>Bad A</i>	1,338	1,35	1,36	1,36	1,40	0,02
<i>Bad B</i>	2,833	2,88	2,88	2,89	1,78	0,05
<i>Bad C</i>	1,728	1,72	1,74	1,75	0,81	0,01
<i>Bad D</i>	2,134	2,19	2,17	2,17	2,00	0,04
<i>Bad E</i>	0,390	0,35	0,36	0,37	7,69	0,03
<i>Bad F</i>	0,699	0,72	0,73	0,74	4,43	0,03
<i>WC A</i>	1,389	1,38	1,36	1,38	1,13	0,02
<i>WC B</i>	1,235	1,24	1,26	1,30	2,56	0,03
<i>WC C</i>	1,401	1,44	1,39	1,45	2,36	0,03
<i>WC D</i>	1,237	1,27	1,27	1,31	3,75	0,05
<i>Eltern A</i>	3,456	3,51	3,52	3,52	1,76	0,06
<i>Eltern B</i>	3,610	3,63	3,61	3,64	0,46	0,02

<i>Eltern C</i>	3,455	3,54	3,54	3,55	2,56	0,08
<i>Eltern D</i>	3,609	3,69	3,67	3,69	2,06	0,07
<i>Küche A</i>	1,720	1,74	1,75	1,74	1,36	0,02
<i>Küche B</i>	2,715	2,77	2,78	2,77	2,15	0,06
<i>Küche C</i>	1,721	1,74	1,74	1,73	0,91	0,02
<i>Küche D</i>	2,709	2,75	2,75	2,74	1,39	0,04
Gesamt	2,14	2,09	2,24	2,16	0,05	

b) Messreihe 2 (mit Pause)

Tabelle 9-5: *Messreihe 2 (mit Unterbrechung) – Drei Durchläufe einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding mit Zwischenspeichern nach jeder Hallway und durchschnittliche Abweichung von den Laserwerten in Prozent und in Meter*

Strecke	Laser [m]	Versuch 1 [m]	Versuch 2 [m]	Versuch 3 [m]	Durchschn. Abweichung [%]	Durchschn. Abweichung [m]
<i>Kind1 A</i>	2,473	2,51	2,53	2,51	1,77	0,04
<i>Kind1 B</i>	4,085	4,21	4,23	4,22	3,30	0,13
<i>Kind1 C</i>	2,464	2,45	2,45	2,45	0,57	0,01
<i>Kind1 D</i>	4,097	4,22	4,24	4,21	3,08	0,13
<i>Wohnzimmer A</i>	3,603	3,69	3,74	3,73	3,25	0,12
<i>Wohnzimmer B</i>	5,471	5,66	5,66	5,59	3,03	0,17
<i>Wohnzimmer C</i>	3,604	3,68	3,60	3,62	0,89	0,03
<i>Wohnzimmer D</i>	5,481	5,67	5,79	5,68	4,24	0,23
<i>Kind2 A</i>	2,842	2,90	2,81	2,84	1,08	0,03
<i>Kind2 B</i>	4,868	5,02	4,88	5,11	2,78	0,14
<i>Kind2 C</i>	2,859	2,91	2,90	3,01	2,83	0,08
<i>Kind2 D</i>	4,859	4,99	4,86	5,03	2,08	0,10
<i>Diele A</i>	1,733	1,76	1,78	1,76	1,94	0,03
<i>Diele B</i>	1,735	1,75	1,78	1,81	2,59	0,05
<i>Diele C</i>	1,222	1,27	1,26	1,27	3,66	0,04
<i>Diele D</i>	0,514	0,50	0,5	0,52	2,20	0,01
<i>Diele E</i>	0,511	0,50	0,52	0,51	1,37	0,01
<i>Diele F</i>	1,221	1,20	1,23	1,22	0,84	0,01
<i>Esszimmer A</i>	2,355	2,43	2,40	2,43	2,76	0,07
<i>Esszimmer B</i>	5,443	5,59	5,53	5,59	2,33	0,13
<i>Esszimmer C</i>	2,338	2,42	2,40	2,34	2,08	0,05
<i>Esszimmer D</i>	5,443	5,58	5,54	5,52	1,90	0,10
<i>Gang A</i>	0,991	1,00	0,98	1,01	1,31	0,01

<i>Gang B</i>	0,722	0,74	0,75	0,73	2,49	0,02
<i>Gang C</i>	0,600	0,63	0,62	0,62	3,89	0,02
<i>Gang D</i>	2,103	2,10	2,14	2,11	0,74	0,02
<i>Gang E</i>	1,591	1,62	1,60	1,62	1,40	0,02
<i>Gang F</i>	2,825	2,86	2,89	2,87	1,71	0,05
<i>Bad A</i>	1,338	1,36	1,36	1,35	1,40	0,02
<i>Bad B</i>	2,833	2,88	2,87	2,88	1,54	0,04
<i>Bad C</i>	1,728	1,74	1,79	1,71	1,77	0,03
<i>Bad D</i>	2,134	2,20	2,17	2,15	1,84	0,04
<i>Bad E</i>	0,390	0,37	0,40	0,36	5,13	0,02
<i>Bad F</i>	0,699	0,74	0,72	0,73	4,43	0,03
<i>WC A</i>	1,389	1,44	1,25	1,45	6,02	0,08
<i>WC B</i>	1,235	1,25	1,25	1,26	1,48	0,02
<i>WC C</i>	1,401	1,42	1,48	1,33	4,02	0,06
<i>WC D</i>	1,237	1,26	1,24	1,26	1,32	0,02
<i>Eltern A</i>	3,456	3,55	3,56	3,54	2,72	0,09
<i>Eltern B</i>	3,610	3,62	3,65	3,61	0,46	0,02
<i>Eltern C</i>	3,455	3,58	3,52	3,53	2,56	0,09
<i>Eltern D</i>	3,609	3,71	3,66	3,66	1,87	0,07
<i>Küche A</i>	1,720	1,76	1,75	1,73	1,55	0,03
<i>Küche B</i>	2,715	2,78	2,79	2,77	2,39	0,07
<i>Küche C</i>	1,721	1,76	1,76	1,73	1,69	0,03
<i>Küche D</i>	2,709	2,75	2,76	2,74	1,51	0,04
Gesamt	2,39	2,33	2,19	2,30	0,06	

9.2 Indoornavigationsgraph

9.2.1 Beispielgebäude 1: Universität der Bundeswehr München

Nachfolgend ist ein von Graphmapper erzeugter Indoornavigationsgraph des fünften und sechsten Stockwerkes des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München im JSON-Format zu sehen. Die Zeilenumbrüche und Texthervorhebungen dienen zur Verbesserung der Lesbarkeit.

```

1  {"mHallwayNet": {
2    "0": {
3      "mConnections": [
4        {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "5_Teil3_Treppe2",
5          "mPositionFrom": [-6.7498927, -0.6002545, 1.6178916],
6          "mPositionToList": [[-6.836782, -0.38433716, 1.6747123]],
7          "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 0}],
8      "mCuttedObstacleList": [],
9      "mHallwayPoints": [
10        [[0.66302687, 0.4912916, -1.3116293], [1.2333796, 0.4800904, 1.1591282],
11        [-6.56161, -0.6058808, 2.9104376], [-7.11275, -0.60638064, 0.44899368]],
12      "mMarkers": [], "mName": "5_Teil3",
13      "mRooms": [
14        {"mNumber": "5135", "mPosition": [-0.5775738, 0.6959918, 1.5530776]},
15        {"mNumber": "5101", "mPosition": [-1.2387679, 0.7161212, -0.85825956]},
16        {"mNumber": "5134", "mPosition": [-4.45045, 0.70465964, 2.4068983]},
17        {"mNumber": "5102", "mPosition": [-4.931515, 0.6947372, -0.050222382]}],
18      "mID": 0, "mLevel": 5},
19      "1": {
20        "mConnections": [
21          {"mHallwayToIDList": [7], "mName": "5_Treppe2_Oben",
22            "mPositionFrom": [-6.9536853, -1.5056927, 3.5744212],
23            "mPositionToList": [[-8.697307, 0.48482597, 2.2772021]],
24            "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 1},
25          {"mHallwayToIDList": [], "mName": "5_Treppe2_Unten",
26            "mPositionFrom": [-9.1257305, -1.3537505, 4.136532],
27            "mPositionToList": [],
28            "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 1},
29          {"mHallwayToIDList": [2], "mName": "5_Treppe2_Teil2",
30            "mPositionFrom": [-10.183019, -0.32508674, 2.374873],
31            "mPositionToList": [[-10.375917, -0.34860864, 2.430656]],
32            "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1},
```

```
33     {"mHallwayToIDList": [0], "mName": "5_Treppe2_Teil3",
34     "mPositionFrom": [-6.836782, -0.38433716, 1.6747123],
35     "mPositionToList": [[-6.7498927, -0.6002545, 1.6178916]],
36     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1}],
37     "mCuttedObstacleList": [],
38     "mHallwayPoints":
39     [[-8.93536, -1.2720764, 8.858791], [-10.535353, -0.19576474, 1.091019],
40     [-7.0964465, 0.68361324, 0.3048184], [-5.31728, 0.68347746, 8.033464]],
41     "mMarkers": [], "mName": "5_Treppe2",
42     "mRooms":
43     [{"mNumber": "5103", "mPosition": [-8.946933, 0.17235306, 0.49508762]}],
44     "mID": 1, "mLevel": 5},
45     "2": {
46     "mConnections":
47     [{"mHallwayToIDList": [1], "mName": "5_Teil2_Treppe2",
48     "mPositionFrom": [-10.375917, -0.34860864, 2.430656],
49     "mPositionToList": [[-10.183019, -0.32508674, 2.374873]],
50     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 2},
51     {"mHallwayToIDList": [3], "mName": "5_Teil2_Treppe1",
52     "mPositionFrom": [-30.22147, 0.0014157007, 6.4068866],
53     "mPositionToList": [[-29.759666, 0.070659906, 8.003478]],
54     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 2}],
55     "mCuttedObstacleList": [],
56     "mHallwayPoints":
57     [[-10.551396, -0.30627573, 1.1920576], [-9.991372, -0.2351041, 3.674098],
58     [-29.907408, 0.010351918, 7.7311215], [-30.374876, 0.010565354, 5.8044558]],
59     "mMarkers": [], "mName": "5_Teil2",
60     "mRooms":
61     [{"mNumber": "5132", "mPosition": [-12.219883, 0.9259951, 4.137427]},
62     {"mNumber": "5104", "mPosition": [-12.829584, 0.985408, 1.7227613]},
63     {"mNumber": "5131", "mPosition": [-15.964207, 0.95559, 5.0550904]},
64     {"mNumber": "5105", "mPosition": [-16.617256, 0.96233565, 2.653391]},
65     {"mNumber": "5130", "mPosition": [-19.910982, 1.070554, 6.020571]},
66     {"mNumber": "5106", "mPosition": [-20.503925, 1.022215, 3.5682046]},
67     {"mNumber": "5129", "mPosition": [-23.766375, 1.0516883, 6.9381547]},
68     {"mNumber": "5107", "mPosition": [-24.383417, 1.0873473, 4.478927]},
69     {"mNumber": "5128", "mPosition": [-27.561886, 1.1180073, 7.8694634]},
70     {"mNumber": "5108", "mPosition": [-27.391212, 1.159298, 5.244633]}],
71     "mID": 2, "mLevel": 5},
72     "3": {
73     "mConnections":
74     [{"mHallwayToIDList": [2], "mName": "5_Treppe1_Teil2",
75     "mPositionFrom": [-29.759666, 0.070659906, 8.003478},
```

```
76     "mPositionToList": [[-30.22147, 0.0014157007, 6.4068866]],  
77     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 3},  
78     {"mHallwayToIDList": [5], "mName": "5_Lift",  
79     "mPositionFrom": [-35.33568, 1.4301503, 7.39233],  
80     "mPositionToList": [[-35.493114, 3.6738005, 6.9606194]],  
81     "mType": "LIFT", "mHallwayFromID": 3},  
82     {"mHallwayToIDList": [4],  
83     "mName": "5_Treppe1_Teill1",  
84     "mPositionFrom": [-41.02078, 0.27622855, 10.248471],  
85     "mPositionToList": [[-40.965183, 0.07738973, 11.200138]],  
86     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 3},  
87     {"mHallwayToIDList": [5], "mName": "5_Treppe1_Oben",  
88     "mPositionFrom": [-37.441128, -0.78964645, 13.341036],  
89     "mPositionToList": [[-31.787037, 2.419161, 11.678248]],  
90     "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 3},  
91     {"mHallwayToIDList": [], "mName": "5_Treppe1_Unten",  
92     "mPositionFrom": [-31.567957, -1.0192668, 11.648989],  
93     "mPositionToList": [],  
94     "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 3}],  
95     "mCuttedObstacleList": [],  
96     "mHallwayPoints":  
97     [[[ -30.31828, -0.09836326, 6.0240455], [-28.50573, 0.5221773, 13.003537],  
98     [-39.280834, 0.3988708, 16.70009], [-41.357246, 0.38901126, 8.961239]]],  
99     "mMarkers": [], "mName": "5_Treppe1",  
100    "mRooms":  
101    [{"mNumber": "5111", "mPosition": [-32.696384, 1.313719, 6.6718864]},  
102    {"mNumber": "5113", "mPosition": [-38.413113, 1.3619235, 8.207669]},  
103    {"mNumber": "5114", "mPosition": [-40.249157, 1.4691955, 8.696301]}],  
104    "mID": 3, "mLevel": 5},  
105    "4": {  
106    "mConnections":  
107    [{"mHallwayToIDList": [3], "mName": "5_Teill1_Treppe1",  
108    "mPositionFrom": [-40.965183, 0.07738973, 11.200138],  
109    "mPositionToList": [[-41.02078, 0.27622855, 10.248471]],  
110    "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 4}],  
111    "mCuttedObstacleList": [],  
112    "mHallwayPoints":  
113    [[[ -60.184307, 1.0006125, 17.401152], [-60.793213, 0.81839865, 15.288512],  
114    [-41.507763, 0.057613708, 9.194681], [-40.838562, 0.05950681, 11.430182]]],  
115    "mMarkers": [], "mName": "5_Teill1",  
116    "mRooms":  
117    [{"mNumber": "5121", "mPosition": [-58.344654, 1.4246306, 16.839706]},  
118    {"mNumber": "5119", "mPosition": [-59.057213, 1.5332867, 14.437986]}],
```

```
119 { "mNumber": "5118", "mPosition": [-55.3303, 1.4616346, 13.390998] },
120 { "mNumber": "5122", "mPosition": [-54.608913, 1.558078, 15.7623625] },
121 { "mNumber": "5117", "mPosition": [-51.311783, 1.4363625, 12.365945] },
122 { "mNumber": "5123", "mPosition": [-50.620735, 1.4339086, 14.745507] },
123 { "mNumber": "5116", "mPosition": [-47.5134, 1.3995111, 11.206598] },
124 { "mNumber": "5124", "mPosition": [-46.967854, 1.3214486, 13.545103] },
125 { "mNumber": "5115", "mPosition": [-43.82409, 1.2627474, 9.857478] },
126 { "mNumber": "5125", "mPosition": [-43.19548, 1.2664789, 12.292449] }],
127 "mID": 4, "mLevel": 5 },
128 "5": {
129 "mConnections":
130 [ { "mHallwayToIDList": [3], "mName": "6_Treppe1_Unten",
131 "mPositionFrom": [-31.787037, 2.419161, 11.678248],
132 "mPositionToList": [[-37.441128, -0.78964645, 13.341036]],
133 "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 5 },
134 { "mHallwayToIDList": [], "mName": "6_Treppe1_Door",
135 "mPositionFrom": [-41.00422, 3.4665632, 11.086823],
136 "mPositionToList": [],
137 "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 5 },
138 { "mHallwayToIDList": [3], "mName": "6_Lift",
139 "mPositionFrom": [-35.493114, 3.6738005, 6.9606194],
140 "mPositionToList": [[-35.33568, 1.4301503, 7.39233]],
141 "mType": "LIFT", "mHallwayFromID": 5 },
142 { "mHallwayToIDList": [6], "mName": "6_Treppe1_Teill1",
143 "mPositionFrom": [-29.86874, 3.2188773, 7.765329],
144 "mPositionToList": [[-29.573658, 3.2719169, 7.7113786]],
145 "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 5 } ],
146 "mCuttedObstacleList": [],
147 "mHallwayPoints":
148 [ [-30.4909, 3.2324097, 5.6448646], [-28.55854, 4.251671, 12.87212],
149 [-39.34955, 3.7310667, 16.50146], [-41.554527, 3.7307537, 9.409111] ],
150 "mMarkers": [], "mName": "6_Treppe1",
151 "mRooms":
152 [ { "mNumber": "6114", "mPosition": [-40.28357, 4.615425, 8.743238] },
153 { "mNumber": "6113", "mPosition": [-38.57597, 4.568244, 8.276747] },
154 { "mNumber": "6111", "mPosition": [-32.83107, 4.394678, 6.559834] },
155 { "mNumber": "6109", "mPosition": [-30.941795, 4.41632, 6.0474887] } ],
156 "mID": 5, "mLevel": 6 },
157 "6": {
158 "mConnections":
159 [ { "mHallwayToIDList": [5], "mName": "6_Teill1_Treppe1",
160 "mPositionFrom": [-29.573658, 3.2719169, 7.7113786],
161 "mPositionToList": [[-29.86874, 3.2188773, 7.765329]] ]
```

```
162     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 6},
163     {"mHallwayToIDList": [7], "mName": "6_Teill1_Treppe2",
164     "mPositionFrom": [-9.991363, 2.8266501, 2.2067096],
165     "mPositionToList": [[-9.73555, 1.5706735, 1.4130187]],
166     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 6}],
167     "mCuttedObstacleList": [],
168     "mHallwayPoints":
169     [[-30.123693, 3.7458673, 5.6570415], [-10.418141, 2.8445728, 0.46117908],
170     [-9.812261, 2.9373305, 2.6160305], [-29.647161, 2.9370425, 7.3159018]],
171     "mMarkers": [], "mName": "6_Teill1",
172     "mRooms":
173     [{"mNumber": "6108", "mPosition": [-27.363598, 4.433641, 4.921842]},
174     {"mNumber": "6128", "mPosition": [-27.505198, 4.436439, 7.5651045]},
175     {"mNumber": "6107", "mPosition": [-24.396671, 4.329544, 4.1392374]},
176     {"mNumber": "6129", "mPosition": [-23.666983, 4.3830767, 6.5132713]},
177     {"mNumber": "6108", "mPosition": [-20.569614, 4.239384, 2.9214234]},
178     {"mNumber": "6130", "mPosition": [-20.05171, 4.2441816, 5.2790513]},
179     {"mNumber": "6105", "mPosition": [-16.814646, 4.1688485, 1.7428623]},
180     {"mNumber": "6131", "mPosition": [-16.214968, 4.198691, 4.209328]},
181     {"mNumber": "6104", "mPosition": [-12.903312, 4.144369, 0.74101055]},
182     {"mNumber": "6132", "mPosition": [-12.281331, 4.10187, 3.1983469]}],
183     "mID": 6, "mLevel": 6},
184     "7": {
185     "mConnections":
186     [{"mHallwayToIDList": [6], "mName": "6_Treppe2_Teill1",
187     "mPositionFrom": [-9.73555, 1.5706735, 1.4130187],
188     "mPositionToList": [[-9.991363, 2.8266501, 2.2067096]],
189     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 7},
190     {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "6_Treppe2_Unten",
191     "mPositionFrom": [-8.697307, 0.48482597, 2.2772021],
192     "mPositionToList": [[-6.9536853, -1.5056927, 3.5744212]],
193     "mType": "STAIRS", "mHallwayFromID": 7}],
194     "mCuttedObstacleList": [],
195     "mHallwayPoints":
196     [[-10.1951885, 2.764646, -0.78571355], [-6.790683, 2.3266468, -1.6704546],
197     [-4.8384066, 0.7745725, 5.7103305], [-8.412057, 0.7908735, 6.7101316]],
198     "mMarkers": [], "mName": "6_Treppe2",
199     "mRooms":
200     [{"mNumber": "6103", "mPosition": [-8.758565, 1.9580755, -1.370089]},
201     {"mNumber": "6101", "mPosition": [-6.4497733, 2.645849, -0.47353917]}],
202     "mID": 7, "mLevel": 6}],
203     "mSavedIDCounter": 8}
```

9.2.2 Beispielgebäude 2: 4-Zimmer-Wohnung in Erding

Nachfolgend ist ein von Graphmapper erzeugter Indoornavigationsgraph einer 4-Zimmer-Wohnung in Erding im JSON-Format zu sehen. Die Zeilenumbrüche und Texthervorhebungen dienen zur Verbesserung der Lesbarkeit.

```

1 {"mHallwayNet": {
2   "0": {
3     "mConnections": [
4       {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "Kind2_Gang",
5         "mPositionFrom": [-2.3088243, 0.7883413, 2.1746564],
6         "mPositionToList": [[-2.381808, 0.7813856, 2.2030933]],
7         "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 0},
8       {"mCuttedObstacleList": []},
9       "mHallwayPoints": [
10        [[1.2053232, 0.5004715, -2.0923424], [2.4005663, 0.60588145, 0.5025737],
11         [-2.062626, 0.73920375, 2.682015], [-3.3221858, 0.7392616, 0.113345504]],
12       {"mMarkers": [], "mName": "Kind2", "mRooms": [], "mID": 0, "mLevel": 0},
13     "1": {
14       "mConnections": [
15         {"mHallwayToIDList": [2], "mName": "Gang_Eltern",
16           "mPositionFrom": [-4.970684, 0.8158272, 3.432592],
17           "mPositionToList": [[-5.189813, 0.7836393, 3.523577]],
18           "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1},
19         {"mHallwayToIDList": [4], "mName": "Gang_Esszimmer",
20           "mPositionFrom": [-3.0083635, 0.8504797, 3.7117708],
21           "mPositionToList": [[-2.9819438, 0.8100206, 3.8688035]],
22           "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1},
23         {"mHallwayToIDList": [3], "mName": "Gang_Bad",
24           "mPositionFrom": [-3.8073442, 0.7802603, 2.3236969],
25           "mPositionToList": [[-3.8659904, 0.8316778, 2.1221693]],
26           "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1},
27         {"mHallwayToIDList": [0], "mName": "Gang_Kind2",
28           "mPositionFrom": [-2.381808, 0.7813856, 2.2030933],
29           "mPositionToList": [[-2.3088243, 0.7883413, 2.1746564]],
30           "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 1},
31       "mCuttedObstacleList": []},
32       "mHallwayPoints": [
33         [-2.59502, 0.8892745, 1.75602], [-2.1638534, 0.79277164, 2.673827],
34         [-2.8324506, 0.812267, 2.9757986], [-2.5769055, 0.84203905, 3.5298424],
35         [-4.4761114, 0.8770526, 4.422311], [-5.16625, 0.8770525, 3.0007806]],
36       {"mMarkers": [], "mName": "Gang", "mRooms": [], "mID": 1, "mLevel": 0},

```

```
37 "2": {
38     "mConnections": [
39         {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "Eltern_Gang",
40         "mPositionFrom": [-5.189813, 0.7836393, 3.523577],
41         "mPositionToList": [[-4.970684, 0.8158272, 3.432592]],
42         "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 2}],
43     "mCuttedObstacleList": [],
44     "mHallwayPoints": [
45         [-9.552209, 0.39693534, 2.9831843], [-6.2069006, 0.4651827, 1.4024698],
46         [-4.6792684, 0.9603979, 4.5886226], [-7.935024, 0.9626559, 6.2210217]],
47     "mMarkers": [
48         {"mName": "Fenster", "mPosition": [-7.9757996, 0.99423057, 4.906245]}],
49     "mName": "Eltern", "mRooms": [], "mID": 2, "mLevel": 0},
50     "3": {
51         "mConnections": [
52             {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "Bad_Gang",
53             "mPositionFrom": [-3.8659904, 0.8316778, 2.1221693],
54             "mPositionToList": [[-3.8073442, 0.7802603, 2.3236969]],
55             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 3}],
56         "mCuttedObstacleList": [],
57         "mHallwayPoints": [
58             [-6.041468, 0.92746997, 1.2983952], [-4.128488, 0.84767616, 0.3511291],
59             [-3.9820042, 0.82688695, 0.6646842], [-3.2900693, 0.91831815, 0.34375963],
60             [-2.6999989, 0.88666755, 1.4892423], [-5.2631445, 0.8866677, 2.8179023]],
61         "mMarkers": [], "mName": "Bad", "mRooms": [], "mID": 3, "mLevel": 0},
62     "4": {
63         "mConnections": [
64             {"mHallwayToIDList": [1], "mName": "Esszimmer_Gang",
65             "mPositionFrom": [-2.9819438, 0.8100206, 3.8688035],
66             "mPositionToList": [[-3.0083635, 0.8504797, 3.7117708]],
67             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 4},
68             {"mHallwayToIDList": [6], "mName": "Esszimmer_Wohnzimmer",
69             "mPositionFrom": [-1.713848, 0.7126787, 4.554394],
70             "mPositionToList": [[-1.494457, 0.8507151, 4.338872]],
71             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 4},
72             {"mHallwayToIDList": [7], "mName": "Esszimmer_Diele",
73             "mPositionFrom": [-1.9925939, 0.78598666, 6.024118],
74             "mPositionToList": [[-1.685432, 0.75161505, 5.738834]],
75             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 4},
76             {"mHallwayToIDList": [5], "mName": "Esszimmer_Kueche",
77             "mPositionFrom": [-5.1770806, 0.83446527, 7.6387405],
78             "mPositionToList": [[-5.1279783, 0.8154783, 7.7321053]],
79             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 4}],
```

```
80 "mCuttedObstacleList": [],
81 "mHallwayPoints":
82   [[-6.057453,0.9823025,8.104772],[-7.107907,0.519839,5.9996276],
83   [-2.2191901,0.9078081,3.480204],[-1.0420258,0.90828425,5.611663]],
84 "mMarkers":[],"mName":"Esszimmer",
85 "mRooms":
86   [{"mNumber":"Balkon","mPosition":[-6.366476,0.8909819,7.3049884]}],
87   "mID":4,"mLevel":0},
88 "5":{
89 "mConnections":
90   [{"mHallwayToIDList":4,"mName":"Kueche_Esszimmer",
91   "mPositionFrom":[-5.1279783,0.8154783,7.7321053],
92   "mPositionToList":[-5.1770806,0.83446527,7.6387405]},
93   {"mType":"DOOR","mHallwayFromID":5}],
94 "mCuttedObstacleList": [],
95 "mHallwayPoints":
96   [[-3.2383559,0.75610805,8.762999],[-5.7247057,0.6824822,10.037351],
97   [-6.5340953,0.7322512,8.448502],[-4.069422,0.73236316,7.209533]],
98 "mMarkers":[],"mName":"Kueche", "mRooms":[],"mID":5,"mLevel":0},
99 "6":{
100 "mConnections":
101   [{"mHallwayToIDList":4,"mName":"Wohnzimmer_Esszimmer",
102   "mPositionFrom":[-1.494457,0.8507151,4.338872],
103   "mPositionToList":[-1.713848,0.7126787,4.554394]},
104   {"mType":"DOOR","mHallwayFromID":6}],
105 "mCuttedObstacleList": [],
106 "mHallwayPoints":
107   [[-0.6835713,0.89065003,6.0309315],[-2.3112104,0.5255931,2.7168736],
108   [2.7518706,0.8034994,0.29870164],[4.342659,0.8047133,3.6418817]],
109 "mMarkers":[],"mName":"Wohnzimmer", "mRooms":[]},
110 "mRooms":
111   [{"mNumber":"Terrasse","mPosition": [3.773063,0.9865195,3.8542495]}],
112   "mID":6,"mLevel":0},
113 "7":{
114 "mConnections":
115   [{"mHallwayToIDList":4,"mName":"Diele_Esszimmer",
116   "mPositionFrom":[-1.685432,0.75161505,5.738834],
117   "mPositionToList":[-1.9925939,0.78598666,6.024118]},
118   {"mType":"DOOR","mHallwayFromID":7},
119   {"mHallwayToIDList":8,"mName":"Diele_Kind1",
120   "mPositionFrom":[-0.5822488,0.8049408,6.546386],
121   "mPositionToList":[-0.14717092,0.9238336,6.7730665]},
122   {"mType":"DOOR","mHallwayFromID":7},
```

```
123 {"mHallwayToIDList": [9], "mName": "Diele_WC",
124   "mPositionFrom": [-2.116643, 0.7377564, 7.430863],
125   "mPositionToList": [[-2.0134254, 0.956888, 8.048605]],
126   "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 7},
127   {"mHallwayToIDList": [], "mName": "Eingangstuer",
128     "mPositionFrom": [-0.9542672, 0.54942656, 7.3394814],
129     "mPositionToList": [],
130     "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 7}],
131   "mCuttedObstacleList": [],
132   "mHallwayPoints":
133     [[-0.3238601, 0.88767904, 7.0630407], [-1.9325974, 0.8882136, 7.8293753],
134     [-2.4755778, 0.86745054, 6.660846], [-2.0199208, 0.70721924, 6.4479494],
135     [-2.225119, 0.84599864, 5.985537], [-1.1047504, 0.84600836, 5.4700584]],
136   "mMarkers": [], "mName": "Diele", "mRooms": [], "mID": 7, "mLevel": 0},
137   "8": {
138     "mConnections":
139       [{"mHallwayToIDList": [7], "mName": "Kind1_Diele",
140         "mPositionFrom": [-0.14717092, 0.9238336, 6.7730665],
141         "mPositionToList": [[-0.5822488, 0.8049408, 6.546386]],
142         "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 8}],
143       "mCuttedObstacleList": [],
144       "mHallwayPoints":
145         [[3.4007773, 0.60828364, 4.5022907], [4.5037866, 0.9653581, 6.7570853],
146         [0.75691575, 1.0214801, 8.597582], [-0.3368199, 1.0214803, 6.397736]],
147       "mMarkers": [], "mName": "Kind1", "mRooms": [], "mID": 8, "mLevel": 0},
148       "9": {
149         "mConnections":
150           [{"mHallwayToIDList": [7], "mName": "WC_Diele",
151             "mPositionFrom": [-2.0134254, 0.956888, 8.048605],
152             "mPositionToList": [[-2.116643, 0.7377564, 7.430863]],
153             "mType": "DOOR", "mHallwayFromID": 9}],
154           "mCuttedObstacleList": [],
155           "mHallwayPoints":
156             [[-3.641819, 0.98704445, 7.6025133], [-2.3754346, 0.8240273, 7.005641],
157             [-1.782365, 1.0506248, 8.239561], [-3.021438, 1.0541906, 8.845918]],
158           "mMarkers": [], "mName": "WC", "mRooms": [], "mID": 9, "mLevel": 0}},
159           "mSavedIDCounter": 10}
```

9.3 Gliederung der beigelegten DVD

- Elektronische Version der Masterarbeit
- Demonstrationsvideo der Applikation Graphmapper
- Indoornavigationsgraphen im JSON-Format
 - Fünftes und sechstes Stockwerk des Gebäudes 41/100 der Universität der Bundeswehr München
 - 4-Zimmer-Wohnung in Erding
- Projektordner der Applikation Graphmapper (Android Studio)
 - Quellcode
 - Dokumentation (JavaDoc)
 - Tango-Bibliotheken

Abbildungsverzeichnis

ABILDUNG 2-1: GOOGLE MAPS: MERCEDES-BENZ-ARENA BERLIN MIT GEBÄUDEPLÄNEN FÜR JEDES STOCKWERK [2]	4
ABILDUNG 2-2: KOMPONENTEN EINES INDOORNAVIGATIONSSYSTEMS ALS INFORMATIONSFLUSSDIAGRAMM [5]	5
ABILDUNG 3-1: LOS ZWISCHEN STATION A UND C, NLOS ZWISCHEN STATION A UND B	9
ABILDUNG 3-2: MEHRWEGEAUSBREITUNG EINES SIGNALS ZWISCHEN STATION A UND B	10
ABILDUNG 3-3: PRINZIP DER KOPPELNAVIGATION (ENGL. DEAD RECKONING) [12]	11
ABILDUNG 3-4: TRILATERATION (KUGELSCHNITTE MIT TOA-MESSUNGEN DREIER BEKANNTER STATIONEN), LINKS: RÄUMLICHE ANSICHT [13], RECHTS: ZWEIDIMENSIONALE ANSICHT	13
ABILDUNG 3-5: MULTILATERATION (ZWEIDIMENSIONALE HYPERBELSCHNITTE DURCH TDOA-MESSUNGEN) [17]	14
ABILDUNG 3-6: TRIANGULATION (ZWEIDIMENSIONALE POSITIONSBESTIMMUNG DURCH AOA-MESSUNGEN) [17]	14
ABILDUNG 3-7: DAS KALMAN-FILTER ALS ITERATIVER KREISLAUF	16
ABILDUNG 3-8: ÜBERBLICK TYPISCHER LOKALISIERUNGSTECHNOLOGIEN DER INDOORNAVIGATION	17
ABILDUNG 3-9: LINKS OBEN: SMARTPHONE WEIT VOM BEACON ENTFERNT, VERRINGERTE SIGNALSTÄRKE UND SOMIT REDUZIERTE GENAUIGKEIT; RECHTS OBEN: SMARTPHONE NÄHER AM BEACON, WESHALB SIGNALSTÄRKE UND SOMIT DIE GENAUIGKEIT STEIGEN; LINKS UNTER: PHYSISCHE OBJEKTE (Z.B. WÄNDE) REDUZIEREN SIGNALSTÄRKE; RECHTS UNTER: MENSCHEN BEEINFLUSSEN DAS SIGNAL [37]	21
ABILDUNG 3-10: BSB NAVIGATOR – INDOOR NAVIGATIONSSYSTEM FÜR DIE BAYERISCHE STAATSBIBLIOTHEK [38]	21
ABILDUNG 3-11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES INERTIALEN NAVIGATIONSSYSTEMS [41]	23
ABILDUNG 3-12: INTEGRATION VON INERTIALER ODOMETRIE MIT EINER GLOBALEN LOKALISIERUNGSTECHNOLOGIE DURCH MULTISENSORFUSION MIT EINEM KALMAN-FILTER IN EINEM SOG. HYBRIDEN SYSTEM (ABGEWANDELT NACH [42])	25
ABILDUNG 3-13: BEISPIEL EINER BILDERSEQUENZ (AUFGENOMMEN MIT EINEM IPHONE 6S)	26
ABILDUNG 3-14: WIEDERERKENNEN VON MERKMALEN DURCH MATCHING-ALGORITHMUS (ABGEWANDELT NACH [49])	27
ABILDUNG 4-1: LINKS: DREISCHICHTIGES INDOORGML MODELL, RECHTS: INTER-LAYER-VERBINDUNGEN [56]	36
ABILDUNG 4-2: STRUKTURIERTES (SSM) UND MEHRSCHEIDIGES (MLSM) RAUMMODELL IN INDOORGML [56]	37
ABILDUNG 4-3: KARTENABGLEICH (MAP MATCHING), UM POSITIONSINFORMATIONEN UND DIGITALE KARTE IN VERBINDUNG ZU BRINGEN (ABGEWANDELT NACH [58])	38
ABILDUNG 4-4: GOOGLE MAPS (APPLE IOS): LOKALISIERUNGSGENAUIGKEIT ALS BLAUER KREIS, STEIGENDE GENAUIGKEIT IN DER POSITIONSBESTIMMUNG IN DER RECHTEN GEGENÜBER DER LINKEN BILDSCHIRMAUFAHME (AUFGENOMMEN MIT EINEM IPHONE 6S)	38
ABILDUNG 5-1: LINKS & MITTE: AR- UND 2D-NAVIGATIONSANWEISUNGEN (NAVVIS [62]), RECHTS: 2D-NAVIGATIONSANWEISUNGEN BZW. VISUALISIERUNG DER BERECHNETEN ROUTE (BSB NAVIGATOR [38])	40

ABBILDUNG 6-1: LINKS: ERSTES ENTWICKLUNGSSMARTPHONE [68], RECHTS: AKTUELLES ENTWICKLUNGSTABLET [69]	46
ABBILDUNG 6-2: VORDERSEITE (OBEN) UND RÜCKSEITE (UNTEN) DES „YELLOWSTONE TABLETS“ [70]	47
ABBILDUNG 6-3: LINKS: KORREKTUR DES MOTION TRACKING, RECHTS: LOKALISIERUNG DURCH AREA LEARNING [73]	49
ABBILDUNG 7-1: GRAPHISCHE REPRÄSENTATION DES FÜNFTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN (ZEICHNUNG NICHT MAßSTABSGETREU)	52
ABBILDUNG 7-2: LINKS: HALLWAYNETZWERK DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN, RECHTS: HALLWAY „5_TEIL2“ IM DETAIL	53
ABBILDUNG 7-3: GRAPHISCHE REPRÄSENTATION EINER 4-ZIMMER-WOHNUNG IN ERDING	54
ABBILDUNG 7-4: INDOORNavigationsgraph bzw. –Netzwerk: ÜBERSICHT DER KLASSENSDIAGRAMME AUS DEM PACKAGE „GRAPH“ (VEREINFACHTE DARSTELLUNG OHNE FUNKTIONEN BZW. METHODEN)	55
ABBILDUNG 7-5: ÜBERSICHT ÜBER DIE WICHTIGSTEN ANWENDUNGSFÄLLE DER APPLIKATION GRAPHMAPPER	56
ABBILDUNG 7-6: PACKAGESTRUKTUR UND DEREN KLASSEN IN DER ANWENDUNG GRAPHMAPPER	57
ABBILDUNG 7-7: ENTSTEHUNGSPROZESS DER ECKPUNKTE DURCH SCHNEIDEN VON EBENEN, DIE DURCH WANDMESSUNGEN (WALLMEASUREMENT) UND DER TIEFENWAHRNEHMUNG DES GERÄTS ENTSTEHEN	58
ABBILDUNG 7-8: AKTIVITÄTSDIAGRAMM DER INITIALISIERUNGSPHASE DER ANWENDUNG	58
ABBILDUNG 7-9: AKTIVITÄTSDIAGRAMM ZUM VERHALTEN DES PROGRAMMS BEI ERHALTEN EINES NEUEN FRAMES	60
ABBILDUNG 7-10: AKTIVITÄTSDIAGRAMM ZUM VERHALTEN DES PROGRAMMS BEI ANKLICKEN VON DISPLAYPOSITIONEN	61
ABBILDUNG 7-11: AKTIVITÄTSDIAGRAMM ZUM HINZUFÜGEN EINER NEUEN HALLWAY	61
ABBILDUNG 7-12: AKTIVITÄTSDIAGRAMM ZUM BEENDEN DES AUFZEICHNUNGSMODUS	62
ABBILDUNG 7-13: AUFZEICHNUNGSANSICHT DER APPLIKATION GRAPHMAPPER	63
ABBILDUNG 7-14: KARTENANSICHT DER APPLIKATION GRAPHMAPPER MIT GEBÄUDEPLAN EINES STOCKWERKES	64
ABBILDUNG 7-15: LINKS: KARTENANSICHT DER APPLIKATION GRAPHMAPPER MIT GEBÄUDEPLAN DER HALLWAY „ESSZIMMER“, RECHTS: ANZEIGE DER ERFOLGREICHEN RELOKALISIERUNG IM VIEWER-MODUS	64
ABBILDUNG 7-16: DURCHSCHNITTLCHE ABWEICHUNG DER LÄNGENANGABEN VON GRAPHMAPPER PRO STRECKE IN BEZUG ZU DEN WERTEN DES LASER-ENTFERNUNGSMESSGERÄTS PRO DURCHLAUF (ANGABEN IN PROZENT)	66
ABBILDUNG 7-17: OBEN: REFERENZPLAN DES FÜNFTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN, UNTER: VON GRAPHMAPPER ERZEUGTER PLAN MIT POIS ..	68
ABBILDUNG 7-18: OBEN: REFERENZPLAN DES SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN, UNTER: VON GRAPHMAPPER ERZEUGTER PLAN MIT POIS ..	68
ABBILDUNG 7-19: LINKS: VON GRAPHMAPPER ERZEUGTER PLAN MIT POIS, RECHTS: VON GRAPHMAPPER ERZEUGTER PLAN MIT BESCHRIFTUNGEN DER HALLWAYS	69
ABBILDUNG 7-20: HALLWAYS UND DEREN VERBUNDENE ENTRYPOINTS DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN	70
ABBILDUNG 7-21: HALLWAYS UND DEREN VERBUNDENE ENTRYPOINTS EINER 4-ZIMMER-WOHNUNG IN ERDING	70

ABBILDUNG 7-22: ERZEUGTER INDOORNAVIGATIONSGRAPH EINER 4-ZIMMER-WOHNUNG IN ERDING	70
ABBILDUNG 9-1: REFERENZPLAN DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN (ZEICHNUNG NICHT MAßSTABSGETREU)	77
ABBILDUNG 9-2: REFERENZPLAN EINER 4-ZIMMER-WOHNUNG IN ERDING.....	81

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: VERGLEICH ZWISCHEN OUTDOOR- UND INDOORNAVIGATION MIT MOBILEN ENDGERÄTEN (ABGEWANDELT UND ERGÄNZT NACH [6])	6
TABELLE 3-1: ÜBERBLICK TYPISCHER LOKALISIERUNGSTECHNOLOGIEN DER INDOORNAVIGATION, DIE (TYPISCHE) REICHWEITE BEZIEHT SICH AUF EINEN EINZELNEN KNOTEN (ABGEWANDELT UND ERGÄNZT NACH [32])	18
TABELLE 4-1: MERKMALE UND VARIANTEN DER KARTIERUNGSTECHNIKEN FÜR DIE INDOORNAVIGATION	31
TABELLE 5-1: VERGLEICH ZWISCHEN DIJKSTRA-, A*- UND BELLMAN-FORD-ALGORITHMUS HINSICHTLICH GESCHWINDIGKEIT, VERWENDUNGSMÖGLICHKEIT UND QUALITÄT DER ERGEBNISSE (ABGEWANDELT UND ERGÄNZT NACH [18])	41
TABELLE 7-1: DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG DER LÄNGENANGABEN VON GRAPHMAPPER PRO STRECKE NACH DREI DURCHLÄUFEN PRO MESSREIHE IN BEZUG ZU DEN WERTEN DES LASER- ENTFERNUNGSMESSGERÄTS (ANGABEN IN PROZENT UND IN METERN)	65
TABELLE 9-1: MESSREIHE 1 (OHNE UNTERBRECHUNG) – DREI VOLLSTÄNDIGE DURCHLÄUFE DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN UND DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG VON DEN LASERWERTEN IN PROZENT UND IN METER.....	77
TABELLE 9-2: MESSREIHE 2 (MIT UNTERBRECHUNG) – DREI DURCHLÄUFE DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN MIT ZWISCHENSPEICHERN NACH DEM ERSTEN STOCKWERK UND DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG VON DEN LASERWERTEN IN PROZENT UND IN METER	79
TABELLE 9-3: MESSREIHE 3 (OHNE UNTERBRECHUNG) – DREI VOLLSTÄNDIGE DURCHLÄUFE DES FÜNFTEN UND SECHSTEN STOCKWERKES DES GEBÄUDES 41/100 DER UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN UND DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG VON DEN LASERWERTEN IN PROZENT UND IN METER (AUFNAHMEN OHNE TAGESLICHT UND MIT ABGEKLEBTEN GLASTÜREN).....	80
TABELLE 9-4: MESSREIHE 1 (OHNE UNTERBRECHUNG) – DREI VOLLSTÄNDIGE DURCHLÄUFE EINER 4-ZIMMER- WOHNUNG IN ERDING UND DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG VON DEN LASERWERTEN IN PROZENT UND IN METER.....	81
TABELLE 9-5: MESSREIHE 2 (MIT UNTERBRECHUNG) – DREI DURCHLÄUFE EINER 4-ZIMMER-WOHNUNG IN ERDING MIT ZWISCHENSPEICHERN NACH JEDER HALLWAY UND DURCHSCHNITTTLICHE ABWEICHUNG VON DEN LASERWERTEN IN PROZENT UND IN METER	83

Formelverzeichnis

FORMEL 3-1: BERECHNUNG DER DISTANZ ZWISCHEN SENDER UND EMPFÄNGER BEI DER TOA-METHODE [9] .	11
FORMEL 3-2: KUGELGLEICHUNG EINER TOA-MESSUNG (RESULTIERT AUS ABSTAND ZWISCHEN SENDER UND EMPFÄNGER) [13]	12
FORMEL 3-3: HYPERBELGLEICHUNG EINER TDOA-MESSUNG (RESULTIERT AUS ABSTANDSDIFFERENZ ZWISCHEN ZWEI BEKANNEN UND EINER UNBEKANNEN STATION) [13]	13

Literaturverzeichnis

- [1] Colin Ellard: *You are Here – Why can we find our way to the moon but get lost in the mall?*, Doubleday, 2009
- [2] Google Maps: *Mercedes-Benz-Arena Berlin*, <https://www.google.de/maps/place/Mercedes-Benz+Arena+Berlin/> [Zugriff am: 29.05.2016]
- [3] Hassan A. Karimi: *Universal Navigation on Smartphones*, Springer Science+Business Media, New York, 2011, Kap. 1 & 3
- [4] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Preface & Kap. 3
- [5] Hassan A. Karimi: *Universal Navigation on Smartphones*, Springer Science+Business Media, New York, 2011, Abb. 1.3 (S. 3)
- [6] Hassan A. Karimi: *Universal Navigation on Smartphones*, Springer Science+Business Media, New York, 2011, Tab. 1.2 & 1.3 (S. 11-12)
- [7] Hassan A. Karimi: *Universal Navigation on Smartphones*, Springer Science+Business Media, New York, 2011, Kap. 1.4 (S. 10 ff.)
- [8] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 3 (S. 19 ff.)
- [9] Subatra Goswami: *Indoor Location Technologies*, Springer Science+Business Media, New York, 2013, Kap. 2-3 (S. 9 ff.)
- [10] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Kap. 7.4.2 (S. 288 ff.) + Kap. 9.3.4 (S. 401 ff.)
- [11] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Kap. 1 (S. 1 ff.) + Kap. 6 (S. 217 ff.)
- [12] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Abb. 1.4 (S. 4)
- [13] Sreeram Potluri: *Hyperbolic Position Location Estimator with TDOAs from four stations*, Masterarbeit, New Jersey Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, 2002, Kap. 2 (S. 5 ff.)
- [14] Geomatik aktuell 2012: *Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung – Out- und Indoor*, Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B, Band 7, Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, 2012, Kap. 3 (S. 45 ff.)
- [15] Michael Plath u. a.: *Location Based Traffic Services*, Fallstudienarbeit, Hochschule für Ökonomie und Wirtschaftsinformatik, Hamburg, 2010, http://winfwiki.wifom.de/index.php/Location_Based_Traffic_Services [Zugriff am: 12.05.2016]
- [16] Michael Schmidt: *Positionsbestimmung in Gebäuden*, Proseminar Technische Informatik, Freie Universität Berlin, 2010, http://www.mi.fu-berlin.de/inf/groups/ag-tech/teaching/2009-10_WS/S_19510b_Proseminar_Technische_Informatik/schmidt10positionsbestimmung.pdf [Zugriff am: 12.05.2016]
- [17] Jörg Blankenbach: *Indoor Positionierung – Ein Überblick mit ausgewählten Beispielen*, Vortrag Workshop 3D-Stadtmodelle, RWTH Aachen, Geodätisches Institut, Bonn, 2014,

- http://www.3d-stadtmodelle.org/3d-stadtmodelle_2014/vortraege/13_Blanckenbach_Indoor-Positionierung.pdf [Zugriff am 12.05.2016], S. 21
- [18] Manh Hung V. Le, Dimitris Saragas, Nathan Webb: *Indoor Navigation System for Handheld Devices*, A Major Qualifying Project Report, Worcester Polytechnic Institute, 2009, Kap. 2 (S. 4 ff.)
- [19] Navid Fallah u. a.: *Indoor Human Navigation Systems: A Survey*, Interacting with Computers, Vol. 25 No. 1, Oxford University Press, 2013
- [20] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Kap. 3
- [21] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3.2.2 (S. 43 ff.)
- [22] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 13.5 (S. 79 ff.)
- [23] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3.2.5 (S. 45 ff.)
- [24] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 10 (S. 63 ff.)
- [25] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 4 (S. 53 ff.)
- [26] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 15 (S. 94 ff.)
- [27] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 7 (S. 44 ff.)
- [28] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 5 (S. 36 ff.)
- [29] Navid Fallah u.a.: *Indoor Human Navigation Systems: A Survey*, Interacting with Computers, Vol. 25 No. 1, Oxford University Press, 2013, Kap. 2.2v)
- [30] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3 (S. 35 ff.)
- [31] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012
- [32] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Tabelle 1.1 (S. 3)
- [33] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3.2.1 (S. 38 ff.)
- [34] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 8 (S. 51 ff.)
- [35] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3.2.3 (S. 44 ff.)
- [36] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 13.2 (S. 78)
- [37] Apple: *Getting Started with iBeacon*, Version 1.0 (02.06.2014),
<https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf> [Zugriff am: 15.05.2016]
- [38] Bokowsky + Laymann: *BSB Navigator – Indoor Navigation für die Bayerische Staatsbibliothek*,
<http://www.bokowsky.net/de/aktuell/archiv2016/index.2016.php#news3> [Zugriff am: 15.05.2016]

- [39] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 9 (S. 59 ff.)
- [40] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 3.2.4 (S. 45)
- [41] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Abb. 1.6 (S. 6)
- [42] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Abb. 1.16 (S. 18)
- [43] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Kap. 1 (S. 1 ff.)
- [44] Geomatik aktuell 2012: *Präzise Navigation und mobile Geodatenerfassung – Out- und Indoor*, Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B, Band 7, Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, 2012, Kap. 3 (S. 28 ff.)
- [45] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 14 (S. 86 ff.)
- [46] Subatra Goswami: *Indoor Location Technologies*, Springer Science+Business Media, New York, 2013, Kap. 5 - SLAM (S. 74 ff.)
- [47] Rainer Mautz: *Indoor Positioning Technologies*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 86, Schweizerische Geodätische Kommission, 2012, Kap. 4 (S. 28 ff.)
- [48] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Kap. 13 (S. 517 ff.)
- [49] Paul D. Groves: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second Edition, Artech House Boston / London, 2013, Abb. 13.2 (S. 519)
- [50] Hassan A. Karimi: *CAD and GIS integration*, Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2010, Kap. 3 (S. 51 ff.) & Kap. 6 (S. 130 ff.)
- [51] Hassan A. Karimi: *Indoor Wayfinding and Navigation*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2015, Kap. 6 (S. 109 ff.)
- [52] Dieter Pfoser, Ki-Joune Li: *Web and Wireless Geographical Information Systems*, 13th International Symposium, Südkorea, Springer Verlag, 2014, Kap. 5 (S. 148 ff.)
- [53] OpenStreetMap (OSM): *Wiki*, http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page [Zugriff am: 20.07.2016]
- [54] Marcus Götz, Andreas Hubel, Frederic Kerber: *IndoorOSM – Mapping the World Indoors*, FOSSGIS 2012, Präsentation, 2012
- [55] Hyung-Gyu Ryoo, Taehoon Kim, Ki-Joune Li: *Comparison between two OGC standards for indoor space – CityGML and IndoorGML*, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2834813&dl=ACM&coll=DL&CFID=634525664&CFTOKEN=75253089> [Zugriff am 22.06.2016], Pusan National University, Südkorea, 2015
- [56] *IndoorGML*, <http://indoorgml.net/> [Zugriff am: 22.06.2016]
- [57] A. A. Khan, Z. Yao, T. H. Kolbe: *Context Aware Indoor Route Planning Using Semantic 3D Building Models with Cloud Computing*, 3D Geoinformation Science, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography Springer International, Schweiz, 2015
- [58] Manh Hung V. Le, Dimitris Saragas, Nathan Webb: *Indoor Navigation System for Handheld Devices*, A Major Qualifying Project Report, Worcester Polytechnic Institute, 2009, Abb. 2-8 (S. 25)
- [59] Hassan A. Karimi: *Universal Navigation on Smartphones*, Springer Science+Business Media, New York, 2011, Kap. 1-2 (S. 1 ff.)

- [60] Martin Werner, Sebastian Feld: *Homotopy and Alternative Routes in Indoor Navigation Scenarios*, Ludwig-Maximilian-Universität München, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2014
- [61] L. Liu, S. Zlatanova: *A “Door-to-Door“ Path-Finding Approach for Indoor Navigation*, OTB Research Institute for the Built Environment, Delft University of Technology, Proceedings Gi4DM, 2011
- [62] NAVVIS: *Digitizing the indoors: Indoor mapping – web access – navigation*, <http://www.navvis.com/products/navigation-app/> [Zugriff am: 14.07.2016]
- [63] Technische Universität München – Fakultät für Mathematik: *Graphalgorithmen*, <http://www-m9.ma.tum.de/Allgemeines/GraphAlgorithmen> [Zugriff am 21.07.2016]
- [64] Google: *Project Tango – Concepts*, <https://developers.google.com/project-tango/overview/concepts> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [65] Google: *Project Tango - Developer Overview*, <https://developers.google.com/project-tango/developer-overview> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [66] Google: *About Project Tango*, <https://www.google.com/atap/project-tango/about-project-tango/> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [67] Steffen Tröster: *Optimierung von Augmented Reality Anwendungen durch die Berücksichtigung von Tiefeninformationen mit Googles Project Tango*, Masterarbeit, Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik, Technische Hochschule Köln, 2016, S. 14 ff.
- [68] Abbildung „*Peanut Phone*“, <http://www.androidcentral.com/project-tango> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [69] Abbildung „*Yellowstone Tablet*“, <http://www.pc-tablet.com/google-project-tango-smartphones-tablets-8065> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [70] Google: *Project Tango - Development Kit*, <https://developers.google.com/project-tango/hardware/tablet> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [71] Lenovo: *Project Tango*, <http://www.lenovo.com/projecttango/> [Zugriff am: 03.05.2016]
- [72] Google: *Project Tango – Motion Tracking*, <https://developers.google.com/project-tango/overview/motion-tracking> [Zugriff am 03.05.2016]
- [73] Google: *Project Tango – Area Learning*, <https://developers.google.com/project-tango/overview/area-learning> [Zugriff am 03.05.2016]
- [74] Google: *Project Tango – Depth Perception*, <https://developers.google.com/tango/overview/depth-perception> [Zugriff am: 06.07.2016]
- [75] Google: *Java Floorplan Example*, https://github.com/googlesamples/tango-examples-java/tree/master/java_floor_plan_example [Zugriff am: 06.07.2016]
- [76] Thomas Buchmann: *Elektronisches Leit- und Informationssystem als Webanwendung*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Technische Informatik, Universität der Bundeswehr München, 2014
- [77] Google: *Android Developers*, <https://developer.android.com/> [Zugriff am: 18.07.2016]
- [78] Rajawali: *3D-Engine*, <https://github.com/Rajawali/Rajawali> [Zugriff am: 18.07.2016]
- [79] Google: *Project Tango – Get Device Position and Orientation*, <https://developers.google.com/tango/overview/poses> [Zugriff am: 19.07.2016]
- [80] Bosch: *Laser-Entfernungsmesser DLE 50*, http://www.hiw.de/daten/aktion_bosch_2006_03.pdf [Zugriff am: 19.07.2016]
- [81] Eberhard Gülch: *Investigations on Google Tango Development Kit for Personal Indoor Mapping*, University of Applied Sciences Stuttgart, AGILE, 2016, https://agile-online.org/Conference_Paper/cds/agile_2016/posters/102_Paper_in_PDF.pdf [Zugriff am: 24.07.2016]

- [82] Soojin Kim, Hyung-Gyo Ryoo: *WebGL IndoorGML Viewer*,
<https://github.com/STEMLab/IndoorGML-Viewer> [Zugriff am: 26.07.2016]
- [83] Christian Steinmeyer: *Applications and Limits of Mobile Low-Cost Devices with 3D Sensors for Automated Generation of Groundplans*, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Medieninformatik, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, 2016 (zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit noch nicht veröffentlicht)
- [84] Google I/O 2016: *Introducing Project Tango Area Learning*,
<https://www.youtube.com/watch?v=NTZZCtmR3OY> [Zugriff am: 26.07.2016]
- [85] Macerkopf: *Gerüchte über Dual-Kamera-System im iPhone 7*,
<http://www.macerkopf.de/?s=dual+camera> [Zugriff am: 11.08.2016]
- [86] Macerkopf: *Patentanmeldung von Apple zu Point Cloud Verfahren*,
<http://www.macerkopf.de/2016/03/16/apple-bildverfahren-d-panorama-aufnahmen/>
[Zugriff am: 11.08.2016]
- [87] Tech Times: *Gerüchte über Dual-Kamera-System im Samsung Galaxy S8*,
<http://www.techtimes.com/articles/165932/20160620/samsung-galaxy-s8-latest-rumor-hints-of-dual-camera-setup.htm> [Zugriff am: 11.08.2016]