



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

THM

**CAMPUS
FRIEDBERG**

IEM

Informationstechnik-
Elektrotechnik-Mechatronik

Einsatz von iBeacons in der modernen Lagerverwaltung

Studiengang Medieninformatik

Masterarbeit

vorgelegt von

Thomas Breitbach

geb. in Rüdesheim am Rhein

durchgeführt bei

VIISON GmbH, Darmstadt

Referent der Arbeit: Prof. Dr. rer. nat. Dominik Schultes
Korreferent der Arbeit: Prof. Dr. Stephan Euler
Betreuer bei VIISON: Dipl. Math. Stefan Heppenheimer

Friedberg, 11. Mai 2015

Kurzzusammenfassung

Die Planung des geregelten Warenflusses spielt in der Lagerverwaltung eine bedeutende Rolle. Hierbei muss die Einlagerung sowie die Zusammenstellung der Ware (Kommissionierung) möglichst effizient gestaltet werden, um die Wirtschaftlichkeit des Warenlagers aufrecht zu erhalten. Zeit ist hierbei ein sehr wichtiger Faktor. Eine Indoor-Navigation bzw. Lagernavigation verspricht hierbei beträchtliche Vorteile, da eine Koordination der Laufwege vorgenommen werden kann. Da das weit verbreitete Global Positioning System (GPS) im Gebäude nicht zur Verfügung steht, wird eine neue Möglichkeit gesucht, Indoor-Positionsbestimmungen zu erhalten. *iBeacon* ist eine junge Technologie der Firma *Apple*, die auf dem Bluetooth Low Energy Standard aufbaut und für Location-Based-Services vorgesehen ist. „Einsatz von *iBeacons* in der modernen Lagerverwaltung“ beschäftigt sich mit dem Ansatz, mithilfe der *iBeacon*-Technologie eine möglichst genaue Positionsbestimmung im Gebäude zu erreichen, um eine solide Basis zur Umsetzung der angesprochenen Navigation zu schaffen. Hierzu wird zunächst das Core Location Framework von *Apple* mit dem Estimote SDK unter Zuhilfenahme von drei verschiedenen Sendeleistungen untersucht und anhand der Signalstreuung und weiteren Indikatoren herausgestellt, welche der beiden unter welcher Sendeleistung qualifiziert für den Einsatz in der Indoor-Positionierung ist. Ferner kann gezeigt werden, wie die empfangene Signalstärke (RSSI) durch die Änderung des Winkels und der Orientierung zum Beacon beeinflusst wird. Es wird deutlich, wie wichtig ein Modell zur Beschreibung der Signalausbreitung ist, um darauf aufbauend den Abstand zwischen Beacon und Empfänger schätzen zu können. Nach der Beschreibung einer mathematischen Lösung zur Positionsbestimmung (Trilateration) werden Testparameter aufgestellt, die sich auf die Genauigkeit einer Positionsschätzung auswirken können. Mithilfe der für iOS implementierten Prototypen werden diese evaluiert und für den Einsatz im Warenlager ausgewertet. Abschließend folgt die Vorstellung eines auf Grundlage der Untersuchungen entwickelten Konzepts für den Einsatz der Technologie im Warenlager, darunter Beaconplatzierung, Kalibrierung, und Interaktion der Navigationssoftware mit dem Benutzer.

Abstract

In warehouse management scheduling the steady flow of goods is very important. The processes stocking and picking of goods have to be efficient to maintain the thrift. Therefore, time plays a central role in it. Because of the path finding and path coordination an indoor-navigation, respectively warehouse-navigation, is advantageous for the whole management. Unfortunately, the wide-spread global positioning system is not available indoors, hence another technology needs to be found. *iBeacon* is a technology by *Apple* based on bluetooth low energy, made for so called location-based-services and has been published recently. 'Deployment of iBeacons in the modern warehouse management' deals with using it for getting indoor-positioning updates while being as accurate as possible. Concerning this, a reliable basis can be created for implementing the addressed navigation. For this purpose, the Core Location Framework by *Apple* and the Estimote SDK are compared by their signal distribution and other indicators using three settings of different broadcasting power. The study leads in the decision which software and broadcasting power fits best for the use in the mentioned case. Moreover, it can be seen how the received signal strength can be influenced by changing the angle and orientation to the beacon. To estimate the distance between beacon and receiver a model which describes the signal attenuation is necessary. After describing the approach on how to solve the positioning problem mathematically (trilateration), certain control parameters which can influence the accuracy of the position estimate are established. By implementing these parameters for the operating system iOS they can be evaluated for the service in warehouses. Finally, a draft based on lessons learned is introduced to inform about the usage of the technology in warehouses, including the deployment of beacons, calibration of path-loss model and interactions between the navigation software and the user.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei Prof. Dr. Schultes und Prof. Dr. Euler für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Des Weiteren danke ich der Firma VIISON für die Bereitstellung der Arbeitsgeräte sowie eines sehr angenehmen Arbeitsklimas. Meinem Betreuer seitens VIISON, Stefan Heppenheimer, danke ich besonders für die Betreuung und die Unterstützung bei mathematischen Problemen. Aber auch allen Kollegen, die in gemeinsamen Gesprächen für Inspirationen und Anregungen gesorgt haben, spreche ich meinen Dank aus.

Natürlich danke ich auch allen anderen Unterstützern. Sei es für zahlreiche Korrekturlesungen, die Unterstützung bei Testmessungen oder die gelegentliche Ablenkung von der Arbeit, um anschließend mit neuer Kraft anzupacken.

Ein besonderer Dank geht an meine Freundin Katha, die mir stets mental zu Seite gestanden, zugehört, für Inspirationen gesorgt und sich Korrekturlesungen angenommen hat. Vielen Dank dafür!

Ebenso danke ich meiner Familie für die sehr große Unterstützung meiner gesamten Ausbildungslaufbahn - von der Schullaufbahn bis zum Abschluss meines Studium. Ohne euch wäre es nicht dazu gekommen! Danke!

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Ich habe die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Hochschule oder Prüfungsstelle vorgelegt.

Friedberg, Mai 2015

Thomas Breitbach

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Selbstständigkeitserklärung	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung	3
1.4 Unternehmensumfeld	3
1.5 Struktur	3
2 Verwandte Arbeiten	5
2.1 WLAN-basierte Systeme	5
2.1.1 WLAN-basierte Warenverfolgung	7
2.2 Bluetooth- und Bluetooth Low Energy-basierte Systeme	8
2.2.1 Bluetooth	8
2.2.2 Bluetooth Low Energy	11
2.2.3 Kommerzielle Systeme	13
3 Grundlagen	15
3.1 Industrie 4.0	15
3.2 Positionierungsverfahren	16
3.2.1 Trilateration	16
Zeitmessungsverfahren	16
Signalstärkemessungsverfahren	17

3.2.2	Triangulation	18
3.2.3	Fingerprinting	18
3.3	Pfadverlust	18
3.3.1	Log-Distance Path-Loss Model	19
3.4	Bluetooth Low Energy	20
3.4.1	Physical Layer	21
3.4.2	Link Layer	23
	Packet Format	24
3.4.3	Host Controller Interface	25
3.4.4	Generic Attribute Profile	25
3.4.5	Generic Access Profile	26
3.5	iBeacons	27
3.5.1	Advertising-Kanal	27
3.5.2	Abstandsmessung	28
	Zonen	28
3.5.3	Software	29
4	Problemanalyse und Zwischenfazit	31
4.1	Analyse	31
4.2	Zwischenfazit	33
5	Estimote Indoor Location	37
5.1	Indoor Location SDK	38
	5.1.1 Wichtige Klassen und Methoden	40
5.2	Testszzenarien	42
	5.2.1 Aufenthaltsraum der VIISON GmbH	42
	Versuchsaufbau	43
	Ergebnisse	44
	5.2.2 Küche	46
	Versuchsaufbau	47
	Ergebnisse	48
5.3	Zwischenfazit Estimote Indoor Location	50
6	Signaluntersuchungen	53
6.1	Core Location Framework und Estimote SDK	53
	6.1.1 Core Location Framework	54
	6.1.2 Estimote SDK	56
	6.1.3 Zwischenfazit Core Location und Estimote SDK	58
6.2	Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten	61
	6.2.1 Winkelabhängige Messungen bei frontaler Ausrichtung	62
	+4 dBm	62
	-8 dBm	63
	6.2.2 Signalstärkeabweichungen bei Ausrichtungsänderung	64
	Tangential	65

Rückwärts	66
6.2.3 Zwischenfazit Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten	67
6.3 Zwischenfazit Signalstärkeuntersuchungen	67
7 Indoor-Positionierungssystem	69
7.1 Vorüberlegungen	69
7.1.1 Kalibrierung und Abstandsschätzung zum <i>iBeacon</i>	69
7.1.2 Positionsbestimmung mithilfe des (Tri-)Lateration-Verfahrens	71
7.2 Testparameter	72
7.3 Umsetzung für iOS	75
7.4 Evaluation	78
7.4.1 Ergebnisse	79
7.4.2 Auswertung und Interpretation	82
7.5 Zwischenfazit Indoor-Positionierungssystem	86
8 Einsatz im Warenlager	89
8.1 Anforderungen	89
8.2 Konzept	90
8.3 Schlüsselsituationen	92
8.4 Zwischenfazit Einsatz im Warenlager	93
9 Ergebnisse	95
10 Zusammenfassung und Ausblick	99
10.1 Zusammenfassung	99
10.2 Ausblick	101
A Phänomene der Wellenausbreitung	103
B Estimote Indoor Location	107
B.1 Location Setup	107
B.2 Beispielcode	110
B.3 Testergebnisse	111
B.3.1 Aufenthaltsraum	111
B.3.2 Küche	112
C Signalunterersuchungen	113
C.1 Messergebnisse bei Ausrichtungsänderung	113
C.2 t-Test: Frontal - Tangential	115
C.3 t-Test: Frontal - Rückwärts	116
C.4 Unabhängigkeitstest Fehlmessungen	118
D Indoor-Positionierungssystem	119
D.1 Ergebnisse	121

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	127

Abbildungsverzeichnis

2.1	Paletten mit Eisenanteilen beeinflussen die Signalausbreitung	9
2.2	Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilung aus 20 Messungen zur Annäherung	11
2.3	indoors GmbH App zur Navigation im Flughafen San Franciscos	13
3.1	Industrie 4.0: Akteure	16
3.2	Geometrische Darstellung der Trilateration	17
3.3	Bluetooth LE Stack	22
3.4	BLE Kanalverteilung	22
3.5	Link Layer: Packet Format	24
3.6	GATT-Profil	26
3.7	iBeacon Advertising-Channel PDU	28
3.8	Störung der Signalausbreitung	29
4.1	TSP im Warenlager	32
4.2	Lagermodell	33
5.1	Indoor Location SDK und Core Bluetooth	39
5.2	Orientierung im Indoor Location SDK	41
5.3	Aufenthaltsraum bei VIISON	43
5.4	Aufenthaltsraum Plan	44
5.5	Aufenthaltsraum: Ergebnis der Navigation	47
5.6	Küche Plan	48
5.7	Küche: Ergebnis der Navigation	50
6.1	Messungen im Stand - Versuchsaufbau	53
6.2	Messungen im Stand - Core Location Framework	56
6.3	Messungen im Stand - Fehlmessungen Core Location	57
6.4	Messungen im Stand - Estimote SDK	58
6.5	Messungen im Stand - Fehlmessungen EstimoteSDK	59
6.6	Vergleich der Signalverteilungen (CL, EST)	61
6.7	Versuchsaufbau Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten	62
6.8	Winkelabhängige Messungen +4 dBm	63
6.9	Winkelabhängige Messungen -8 dBm	64
6.10	Orientierungen	65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

7.1	ViewController	76
7.2	Versuchsaufbau Aufenthaltsraum	78
8.1	Gänge im Warenlager	89
8.2	Zonen, Beaconplatzierung, Wächterbeacon	91
8.3	Mockup Lagernavigation	93
A.1	Reflexion elektromagnetischer Wellen	103
A.2	Streuung elektromagnetischer Wellen	103
A.3	Beugung elektromagnetischer Wellen	104
A.4	Mehrwegeempfang	105
B.1	Estimote Indoor Location Setup Prozess	107
B.2	Aufenthaltsraum: Ergebnis Ausrichtungen	111
B.3	Aufenthaltsraum: Ergebnis LOS vs. NLOS	111
B.4	Küche: Ergebnis Ausrichtungen	112
B.5	Küche: Ergebnis LOS vs. NLOS	112
C.1	Winkelabhängige Messeungen, 1 m, +4 dBm	113
C.2	Winkelabhängige Messeungen, 2 m, +4 dBm	114
C.3	Winkelabhängige Messeungen, 3 m, +4 dBm	114
C.4	t-Test: Frontal - Tangential - 1 m	115
C.5	t-Test: Frontal - Tangential - 2 m	115
C.6	t-Test: Frontal - Tangential - 3 m	116
C.7	t-Test: Frontal - Rückwärts - 1 m	116
C.8	t-Test: Frontal - Rückwärts - 2 m	117
C.9	t-Test: Frontal - Rückwärts - 3 m	117
D.1	Normalverteilung der RSSI-Werte	119
D.2	Punktkalrierung Flussdiagramm	120
D.3	Ergebnisse der Positionsschätzungen - 1	121
D.4	Ergebnisse der Positionsschätzungen - 2	122
D.5	Ergebnisse Filter - 1	123
D.6	Ergebnisse Filter - 2	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Link-Layer Zustände	23
3.2	Typen von Advertising PDUs	25
4.1	Parameter für die Energiekostenberechnung	34
5.1	Messergebnisse Aufenthaltsraum	45
5.2	Aufenthaltsraum: LOS vs. NLOS	46
5.3	Messergebnisse Küche	49
5.4	Küche: LOS vs. NLOS	49
6.1	Überlagerung der Distanzbereiche bei +4 dBm	63
6.2	Überlagerung der Distanzbereiche bei -8 dBm	64
7.1	Vergleich Kalibrierungsarten	70
7.2	Testparameter	73
7.3	Positionierungsklassen	77
7.4	Kategorien der Positionsschätzungen	79
7.5	Kategorie „sehr gut“	80
7.6	Kategorie „gut“	81
7.7	Randpositionen	82
C.1	Vierfeldertafel Fehlmessungen	118

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel dient zur Einführung in das Thema „Einsatz von iBeacons in der modernen Lagerverwaltung“ der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit. Hierzu werden neben der Motivation zur Bearbeitung auch Hintergründe, sowie eine konkrete Problemstellung genannt, die in den darauffolgenden Kapiteln durch Erläuterung verschiedener Methoden bearbeitet wird.

1.1 Motivation

Im Jahre 2013 hat *Apple Inc.* aus Kalifornien, parallel zur Einführung des mobilen Betriebssystems iOS 7, eine Lösung namens *iBeacon* für standortbezogene Dienste auf Basis der Bluetooth Low Energy (BLE) Technologie vorgestellt. *iBeacons* sind energieeffiziente Bluetooth-Sender, die nur wenige Zentimeter groß und mit einer Knopfzelle ausgestattet sind. Je nach eingestelltem Übertragungsmodus, können sie eine Laufzeit von mehr als 5 Jahren erreichen. Das englische Wort „beacon“ kann mit „Leuchtfeuer“ oder „Leuchtturm“ übersetzt werden und verdeutlicht die Funktionsweise eines solchen Senders. Einem Leuchtturm ähnlich, sendet ein *iBeacon* Signale mit endlicher Reichweite aus und kann hierdurch alle Geräte, wie Smartphones oder Tablet-Computer, die sich in Reichweite des Beacons befinden und über BLE kommunizieren, unter Zuhilfenahme dieses Signal mit zusätzlichen, standortbezogenen Informationen versorgen. Das Einsatzgebiet dieser Technologie reicht dabei von der Verbesserung von Audio-Guides in Museen, welche Auskunft zum nächstgelegenen Kunstwerk automatisch bereitstellen, bis hin zu personalisierter Customer Experience¹ im Einzelhandel, die dem Kunden Informationen und interaktive Inhalte zu dem Produkt liefern kann, vor dem er sich gerade befindet. Ein seit der Einführung seitens *Apple Inc.* immer wiederkehrendes und begehrtes Szenario für den Einsatz der *iBeacon*-Technologie ist die Umsetzung einer Navigation in geschlossenen Räumen beziehungsweise Gebäuden (Indoor-Navigation). Dies liegt vor allem daran, dass die zumeist im Freien genutzte Satellitentechnologie GPS² durch die hohe Dämpfung der Baustoffe in Gebäuden nicht zur

¹Kundenerfahrungen

²Global Positioning System

Verfügung steht.

Eine Indoor-Navigation mittels *iBeacon*-Technologie könnte neben dem Einsatz in öffentliche Gebäuden zum Ausfindigmachen bestimmter, interessanter Orte (POI³), wie Fahrkartenschalter oder Geldautomaten, auch in der modernen Lagerverwaltung eine wichtige Rolle spielen. Einerseits müssen Waren eingelagert und einem bestimmten Lagerplatz zugewiesen werden, andererseits ist es notwendig aus dieser Gesamtmenge von Waren, beispielsweise anhand einer vorliegenden Bestellung, Teilmengen zusammenzustellen (Kommissionierung) und im Anschluss an den Kunden zu versenden. Hierbei ist Zeit als Ressource ein stets kritischer Faktor, der effizient genutzt werden muss. Die Kundenzufriedenheit wird neben der Qualität der Ware durch schnelle Lieferzeiten erhöht, die, besonders vorangetrieben von Großkonzernen wie *Amazon.com Inc.*, gegenwärtig von jedem Händler erwartet wird.

Unter Einsatz einer Indoor-Navigation mit *iBeacon*-Technologie könnten die Arbeitsschritte bei der Lagerverwaltung kostengünstig und effizienter gestaltet, vorangetrieben und verbessert werden.

1.2 Problemstellung

Eine Lagerhaltung, als Teilbereich der Lagerverwaltung, bringt zahlreiche Problemstellungen mit sich, die nicht trivial sind. Zum einen stellt sich beim Wareneingang die Frage nach dem Lagerstandort, somit wo die neu eingetroffene Ware gelagert werden soll. Hierbei muss zwischen zwei Zuordnungsarten unterschieden werden: Festplatzzuordnung und dynamische Platzzuordnung. Bei der Festplatzzuordnung wird ein Produkt immer an der selben Stelle gelagert und hierfür ein bestimmter Bereich reserviert. Bei der dynamischen Platzzuordnung, auch bekannt als chaotische Lagerhaltung, kann hingegen ein Produkt an mehreren Stellen gelagert werden, abhängig davon, wo gerade ein Freiraum besteht. Hierdurch ist eine Maximalauslastung des betreffenden Lagers möglich, da keine eventuell ungenutzten Lagerplatzreservierungen angelegt werden, wie es bei der Festplatzzuordnung der Fall ist. Allerdings bedarf diese Art der Lagerhaltung einem zusätzlichen Organisationsaufwand, da bei jeder Einlagerung der Lagerplatz festgehalten werden muss (Asset Tracking). Nur so kann die Ware bei der späteren Kommissionierung wieder gefunden werden. Jedoch muss dieses Festhalten möglichst automatisch geschehen, ohne weiteren Arbeitsaufwand zu generieren.

Des Weiteren ist es beim Kommissionieren sehr wichtig, die Waren möglichst effizient zusammenzustellen. Um den bereits erwähnten Faktor Zeit gering zu halten, muss demnach eine Koordination der Laufwege stattfinden. Andernfalls kommt es dazu, dass durch Produkte, die zwar im Lager nahe beieinander liegen, in der Bestellung jedoch nicht aufeinanderfolgend aufgeführt werden, Wege mehrfach gelaufen werden müssen. Dies führt unweigerlich zu einem Anstieg der Wegstrecke und einer höheren Kommissionierdauer als erforderlich.

³Points of Interest, dt. „Sehenswürdigkeit“, „interessanter Ort“

1.3 Zielsetzung

Auf Grundlage der zuvor genannten Problemstellung in der Lagerhaltung und dem möglichen Potential der *iBeacon*-Technologie (beim Wareneingang und -ausgang) ist das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit zu prüfen, inwiefern der Einsatz der Technologie für das Warenlager geeignet ist.

Hierzu muss diese noch sehr junge Technik zunächst weiter erforscht und geprüft werden, ob und unter Anwendung welcher Techniken und Verfahren sie sich zum Einsatz in einer Indoor-Positionierung eignet. Dabei soll stets der Aspekt der Lagerverwaltung im Auge behalten werden. Zur Durchführung dieser Evaluation sind prototypische Implementierungen für das Betriebssystem iOS anzufertigen, welche für die Untersuchung von Signalstärkeeigenschaften bis hin zu Tests von Techniken und Herangehensweisen zur möglichst genauen Standortbestimmung, die empirisch betrachtet und ausgewertet werden.

Abschließend soll ein Konzept entwickelt werden, wie auf Basis der zuvor gemachten Erkenntnisse eine Indoor-Navigation im Warenlager umgesetzt werden kann. Es dient letztendlich als solide Basis für die Umsetzung der Navigation, welche die Wirtschaftlichkeit des Warenlagers erhöht, und der weiterführende Forschung.

1.4 Unternehmensumfeld

Die *VIISON* GmbH mit Sitz in Darmstadt ist ein Startup, das sich auf die Entwicklung von Webshops sowie mobilen Anwendungen spezialisiert hat. Ein Hauptaugenmerk ihrer Arbeit liegt in der Optimierung von Prozessen der Lagerverwaltung. Hierzu bietet *VIISON* zwei mobile Anwendungen für das Betriebssystem iOS an, die zum Einlagern (Stocking-App) und Kommissionieren (Picking-App) der Ware im Lager eingesetzt werden. Zusätzliche Unterstützung bei der Prozessoptimierung bieten die von *VIISON* entwickelten Plugins für das Onlineshopsystem Shopware⁴, beispielsweise zur automatischen Generierung von Versandetiketten.

1.5 Struktur

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel. Zunächst folgt in Kapitel 2 eine umfassende Erläuterung verwandter Arbeiten sowie deren eingesetzter Techniken im Umfeld der Indoor-Positionierung. Das Kapitel gliedert sich in WLAN-basierte Systeme und Systeme, die auf die Funktechnik Bluetooth bzw. Bluetooth Low Energy setzen.

In Kapitel 3 werden alle nötigen Grundlagen beschrieben, die zum Verständnis der darauf folgenden Kapitel von Bedeutung sind. Hierzu zählen neben verschiedenen Positionierungsverfahren und der Erläuterung der Phänomene des Mehrwegeempfangs und des Pfadverlustes ebenso eine ausführliche Beschreibung der Bluetooth Low Energy- und der

⁴<http://www.shopware.de>

darauf aufbauenden *iBeacon*-Technologie.

Darauf folgt in Kapitel 4 eine Darstellung der in dieser Arbeit zu behandelnden Kernprobleme sowie eine begründete Auswahl der in der zuvor vorgestellten Verfahren und Techniken zum Einsatz in Indoor-Positionierungssystemen.

Zunächst wird das Indoor Location SDK der Firma *Estimote* in Kapitel 5 in zwei verschiedenen Umgebungen getestet. Anschließend werden in Kapitel 6 eine Reihe von Signaluntersuchungen unter Einsatz des Core Location Frameworks und dem Estimote SDK vorgenommen, um die Charakteristiken der Signalausbreitung herauszuarbeiten. Diese Erkenntnisse werden für die Implementierung eines Indoor-Positionierungssystems für iOS genutzt. Die Umsetzung des Systems wird in Kapitel 7 beschrieben und zur weiteren Überprüfung von aufgestellten Testparametern eingesetzt, die sich auf die Genauigkeit des Systems auswirken können.

Abschließend dient das Kapitel 8 zur Vorstellung eines Konzept, wie die *iBeacon*-Technologie zur Umsetzung einer Navigation im Warenlager eingesetzt werden kann.

Kapitel 2

Verwandte Arbeiten

Wie bereits in Kapitel 1.3 erläutert, ist das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit zu prüfen, ob sich *iBeacons* für den Einsatz in der Lagerverwaltung eignen. Sowohl das Feld der Indoor-Navigation als auch -Positionierung in der modernen Lagerverwaltung spielen zwar auf Grund wirtschaftlicher Faktoren eine immer größer werdende Rolle, sind jedoch bis heute in der Literatur nur sehr spärlich behandelt. Dies liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit daran, dass Konzerne ihr Wissen, sofern ihrerseits bereits eine Forschung in diesem Gebiet stattgefunden hat, als Wettbewerbsvorteile aktiv nutzen möchten.

Lediglich eine Arbeit konnte im Umfeld der Navigation im Warenlager ausfindig gemacht werden, die dieses Thema tatsächlich näher beleuchtet und nicht ausschließlich als exemplarisches Einsatzszenario benennt. Aus diesem Grund werden im Folgenden überwiegend Techniken und Herangehensweisen erläutert, die allgemein das Problem der Navigation und Positionierung im Gebäude thematisieren.

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Publikationen hinsichtlich Indoor-Positionierung beschrieben, sowie kurz deren Merkmale und Unterschiede herausgearbeitet. Hierbei wird zwischen signalstärkebasierten Systemen, die zur Berechnung auf WLAN¹ oder Bluetooth/BLE² zurückgreifen, unterschieden. Ferner existieren weitere Technologien, allerdings erfahren diese eine weitaus geringere Verbreitung und/oder bedürfen zum Einsatz in dem genannten Szenario zusätzlicher Hardware. Dies liegt daran, dass sie nicht auf der Messung der Signalstärken aufbauen, sondern beispielsweise den Winkel des Benutzers zu den jeweiligen Zugangsgeräten ermitteln (AOA³).

2.1 WLAN-basierte Systeme

Der Wunsch neben der Positionsbestimmung im Freien auch in Gebäuden oder Arealen, die den Einsatz des verbreiteten GPS unmöglich machen, einen aktuellen und möglichst

¹Wireless Local Area Network

²Bluetooth Low Energy

³Angle-of-Arrival

präzisen Standort zu erhalten, existiert nicht erst seit Einführung der *iBeacon*-Technologie.

Bereits im Jahre 2000 publizieren die Autoren Paramvir Bahl und Venkata N. Padmanabhan von *Microsoft* Research eine Vorgehensweise, mittels WLAN Funksendern, deren Senderposition bekannt ist, einen Standort zu ermitteln. Das sogenannte *RADAR*⁴-System [BP00] erstellt in einer vorangegangenen Offlinephase ein Raster von Fingerprints⁵, die serverseitig persistiert und in der darauffolgenden Onlinephase dem Client zur Verfügung gestellt werden. Ein solcher Fingerprint beinhaltet neben der Position im Raum auch die an dieser Stelle gemessene Signalstärke (RSSI⁶). In dieser wird durch einen Abgleich der aktuell empfangenen Signalstärken und der zuvor gespeicherten jene Position dem Benutzer zugeordnet, die am Besten zu den Daten der Offlinephase passt.

Die Entscheidung trifft hierbei ein Algorithmus namens *Nearest Neighbour(s) in signal space* (NNSS), der die Distanz zwischen den aktuell erfassten Messwerten in der Onlinephase mit der Wertemenge der Offlinephase vergleicht. Dabei wird ein Fingerprint als Position bestimmt, der den Abstand beziehungsweise Fehler minimieren kann. Als Methoden zur Distanzberechnung kommt der Satz des Pythagoras zum Einsatz, mit dessen Hilfe die Euklidische Distanz bestimmt wird. Die Autoren erreichen mit ihrer Methode eine durchschnittliche Genauigkeit von zwei bis drei Meter.

Da der NNSS-Algorithmus bei wiederholter Eingabe der gleichen Signalstärken stets die gleichen Werte für die geschätzte Positionsbestimmung liefert, wird das *RADAR*-System in die Kategorie der deterministischen⁷ Systeme eingeordnet. [YA05]

Das *Horus*-System [YA05] ist ein Lokalisierungssystem, welches, im Gegensatz zu *RADAR*, bei der Positionsbestimmung mit Wahrscheinlichkeiten arbeitet und damit zu den probabilistischen⁸ Systemen zählt. Hierbei wird versucht diejenige Position zu finden, welche die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(x|s)$ mit der Position $x \in X$ und der empfangenen Signalstärken $s = (s_1, \dots, s_k)$ maximiert. Der im System verwendete Algorithmus wird von den Autoren als sehr leichtgewichtig beschrieben, sodass die Berechnung der Positionsschätzung auf dem Client möglich ist. Dies wird zum Beispiel durch Clustering, also der Aufteilung der Örtlichkeit in kleinere Unterorte, erreicht. Darüber hinaus wird durch die Autoren Youssef und Agrawala herausgestellt, dass der Abstand zwischen den Fingerprints mehr als einen Meter betragen sollte. Dies führt einerseits zum Verlust von Genauigkeit, andererseits wird hierdurch abermals die Größe der Datenbank, in der die Messpunkte zentral zur Verfügung gestellt werden, erheblich reduziert. Die in der Offlinephase bewusst reduzierten Referenzpositionen können in der anschließenden Onlinephase durch parametrische Modelle angenähert werden, wodurch keine 'Nullwahrscheinlichkeiten' für eine Messung auftreten. Auf Grundlage einer hohen gemessenen Autokorrelation der empfangenen Signalstärken zeigen die Autoren, dass die Genauigkeit des *Horus*-Systems bei steigender Anzahl von Messungen in der Onlinephase erhöht werden kann. Allerdings erfährt hierdurch die Latenz

⁴radio-frequency (RF) based system for locating and tracking users

⁵Mess- bzw. Referenzpunkte

⁶Received Signal Strength Indicator

⁷lat. determinare „abgrenzen“, „bestimmen“

⁸die Wahrscheinlichkeit berücksichtigend

zur nächsten Positionsschätzung einen Anstieg und steht damit mit der Präzision in einem Spannungsverhältnis.

Die Autoren King et al. forschen ebenfalls im Feld der Positionsbestimmung mithilfe von WLAN-Funknetzen und entwickeln das *COMPASS*-System [KKH⁺06]. Dazu nehmen sie sich den bereits durch die Publikation des *RADAR*-Systems bekannt gewordenen Problemen an. In der Offlinephase, die zum Trainieren des Positionierungssystems notwendig ist, wird neben den Koordinaten der Referenzposition und den empfangenen Signalstärken zusätzlich die Orientierung beziehungsweise Ausrichtung des Benutzers und dessen Endgeräts gespeichert. Die Idee hinter diesem zusätzlichen Parameter liegt darin, dass Funknetze im Bereich von 2,4 GHz sehr anfällig für Wasser und damit für den menschlichen Körper sind. Abhängig von der Ausrichtung des Benutzers in der Onlinephase verwendet das System andere Daten, um seine aktuelle Position zu berechnen. Zusätzlich, ähnlich dem *Horus*-System, verwendet *Compass* einen probabilistischen Ansatz. Die Autoren erreichen durch ihre Erweiterung eine durchschnittliche Fehlerdistanz von 1,64 m, was im Mittel eine Verbesserung von 0,62 m im Vergleich zum zuvor beschriebenen *RADAR*-System darstellt.

2.1.1 WLAN-basierte Warenverfolgung

Die Autoren Ibach et al. [ISWL05] der Humboldt Universität Berlin haben sich in ihrer Publikation „WLAN-Based Asset Tracking for Warehouse Management“ mit einem sehr ähnlichen Anliegen, nämlich der Güterverfolgung im Warenlager, beschäftigt. Dies spielt einerseits aus Sicherheitsgründen eine übergeordnete Rolle, andererseits ist die Güterverfolgung ein wichtiger Faktor im 'Supply Chain Management'⁹. Hierzu greifen sie auf das bereits installierte WLAN-System im Lager zurück, das zur Kommunikation zwischen Kommissionierer und dem dahinterliegenden Auftragssystem dient. Durch den Vergleich von drei verschiedenen auf WLAN-basierten Indoorpositionierungssystemen wird versucht eine möglichst exakte Position der Ware mit vorzugsweise geringer Verzögerung zu erhalten. Die Herangehensweise der evaluierten Systeme *MagicMap* (Humboldt Universität, Berlin), *Ekahau*¹⁰ und *MobileLocator Light* des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen ähneln sich. Ein Unterschied zwischen *Ekahau* und *MobileLocator Light* besteht darin, dass *MobileLocator Light* geringere Hardwareanforderungen besitzt und aus diesem Grund ebenfalls auf PDAs¹¹ lauffähig ist.

MagicMap [IH04], ebenfalls von Ibach et al. vorgestellt, erstellt in gleichem Maße in der Offlinephase Messpunkte, die serverseitig persistiert und in der darauffolgenden Onlinephase dem Client zur Verfügung gestellt werden. Eine Besonderheit des Systems liegt im gegenseitigen Transfer der Referenzpunkte, die über eine grafische Oberfläche vom Benutzer eingetragen werden können - Referenzpunkte werden stets allen teilnehmenden Endgeräten zur Verfügung gestellt, egal von welchem Gerät die Messung durchgeführt wird. Daneben ist das System in der Lage die gemessene Signalstärke in eine allgemeingültige Messung

⁹Vernetzung von Lieferanten-, Fertigungs- und Kundenstrukturen

¹⁰Ekahau Inc., <http://www.ekahau.com>

¹¹Personal Digital Assistant

umzurechnen. Dies ist laut den Autoren teilweise notwendig, da sich Hersteller nicht immer oder nur in einem gewissen Maße an die Vorgaben zur Kalibrierung halten. Die Onlinephase gleicht dem *RADAR*-System, wobei ungenaue Positionsschätzungen auch ohne Radio Map möglich sind. [IH04, ISWL05]

Im zuvor beschriebenen Szenario der Güterverfolgung im Warenlager erreicht *MagicMap*, im Gegensatz zu den beiden Vergleichssystemen Ekahau und MobileLocator Light, unter der Verwendung eines PDAs bereits ab einer sehr geringen Anzahl von Referenzpunkten eine durchschnittliche Genauigkeit von 3,25 m bei einer Verfolgungsverzögerung von 150 Sekunden.

Nichtsdestotrotz betonen die Autoren, dass gerade im Warenlager besondere Probleme hinsichtlich der äußeren Umstände und der eingesetzten Funktechnik vorherrschen. Die Wellen des von WLAN überwiegend eingesetzten 2,4 GHz Frequenzbandes erfahren beim Durchtreten von Wasser eine hohe Dämpfung - im Allgemeinen durch Flüssigkeiten und damit den Menschen. [ISWL05, KKH⁺06, BP00] Die Wellenausbreitung wird durch diese Faktoren maßgeblich beeinflusst und verändert damit an betroffenen Positionen die gemessene Signalstärke erheblich. Aber auch Eisen, seien es Trägerkonstruktionen im Lager oder Regalbauwerken, kann die Ausbreitung der Funkwellen beeinflussen und erschwert die Berechnung der Signalstärke. Als weiterführendes Problem wird die sehr hohe Dynamik eines Lagers genannt. Es können plötzlich Waren an einem Lagerplatz stehen, der vor wenigen Minuten noch leer war. Dieses Problem wird in Abbildung 2.1 verdeutlicht. Der Palettenstapel dämpft das Signal und lässt dahinter einen fast toten Punkt entstehen. Zudem kann nicht vorausgesagt werden, in welchem Ausmaß die Ware die Wellenausbreitung beeinflusst, da dies stark von Größe und Material abhängt. Das System muss zu jeder Zeit wissen, wer oder was sich an welchem Ort befindet, um eine exakte Berechnung der Wellenausbreitung und damit eine genaue Positionsschätzung liefern zu können. [ISWL05] Folgendes Zitat beschreibt ausdrücklich, dass keines der drei getesteten Systeme mit einer solch hohen Dynamik verfahren kann:

However, none of the currently available systems can handle the dynamic environment problem where an overwhelming number of factors influence signal dissemination and deteriorate accuracy of WLAN-based positioning. [ISWL05, S. 6]

2.2 Bluetooth- und Bluetooth Low Energy-basierte Systeme

Auch im Nahfunkstandard Bluetooth und in dem mit Version 4.0 der Bluetooth-Spezifikation eingeführten Bluetooth Low Energy (BLE) sind Forschungsergebnisse verfügbar. Sowohl Bluetooth als auch BLE verwenden zur Übertragung das 2,4 GHz Frequenzband. [Blu10]

2.2.1 Bluetooth

Grundlegende Tests hinsichtlich des Einsatzes von Bluetooth-fähigen Geräten zur Positionsschätzung im Gebäude publizieren die Autoren Sheng Zhou und John K. Pollard [ZP06] im Jahre 2006. Hierbei kommt die von WLAN-Positionierungssystemen bekannte Größe

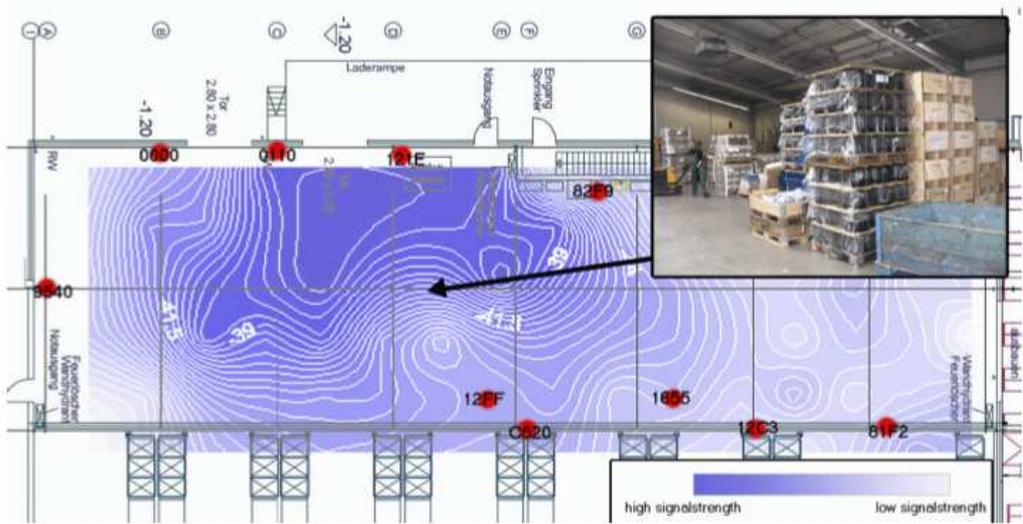


Abbildung 2.1: Paletten mit Eisenanteilen beeinflussen maßgeblich die Signalausbreitung.
Quelle: [ISWL05]

RSSI zum Einsatz, die zur Schätzung des Abstandes zwischen Empfänger und Sender herangezogen wird. Allerdings bedarf die Größe im genannten Szenario, bedingt durch die Bluetooth-Spezifikation, einer Umrechnung, da sie ein Indikator dafür ist, ob und wie stark die empfangene Signalstärke ober- (positiver Wert) oder unterhalb (negativer Wert) einer gegebenen Grenze liegt.

Um die Abschwächung der Signalstärke mit zunehmendem Abstand zum Sender bei Sichtkontakt (LOS¹²) abzubilden, machen die Autoren von einem Wellenausbreitungsmodell Gebrauch. In zwei Testfällen entfernen sie sich jeweils 6,8 m vom Sender und schätzen mit beschriebenem Modell alle 10 cm ihre Entfernung auf Basis der empfangenen RSSI-Werte. Testfall 1 unterscheidet sich insofern von Testfall 2, als dass der zweite direkt neben einer langen Heizungsfront verläuft, die zu erhöhtem Mehrwegempfang und damit zu Interferenzen führt. Dies schlägt sich ebenfalls in den Ergebnissen nieder: Testfall 1 erreicht mit einem durchschnittlichen Fehler von 0,91 m und einer Standardabweichung von 0,95 deutlich bessere Ergebnisse als Testfall 2 (durchschnittlicher Fehler: 1,31 m, Standardabweichung: 1,30). Die Autoren betonen, dass die Genauigkeit eines RSSI-basierten Ansatzes maßgeblich auf der Genauigkeit der RSSI-Werte, einer guten Wahl der Modellparameter zur Modellierung des Signalstärkeverlustes (insbesondere der Path-Loss Exponent n) und einem möglichst geringen Vorkommen von Interferenzen begründet ist. Des Weiteren werden aufgrund der Reichweite der Funktechnik (ca. 10 m) weitaus mehr Funkzellen benötigt als bei WLAN-basierten Ansätzen.

Die Publikation „Joint Estimation of Position and Channel Propagation Model Para-

¹²Line of Sight

meters in a Bluetooth Network“ [RE09] setzt ebenfalls auf das zuvor beschriebene Modell zur Beschreibung des Signalstärkeverlustes. Sie versucht unter Zuhilfenahme von drei Bluetoothsendern die Bestimmung der Position in der Ebene (Trilateration) zu erreichen. Die Autoren betonen ebenfalls, dass der Path-Loss Exponent n ausgesprochen wichtig ist, um gute Schätzungen zu erlangen. Der Exponent kann sich jedoch innerhalb eines kurzen Moments ändern, beispielsweise wenn plötzlich kein Sichtkontakt (NLOS¹³) mehr zum Sender besteht. Im Szenario eines Lagers kann dies, je nach Eigenschaften des Lagers und der Kommissionierweise, durch Hindernisse in Form von Transportpaletten oder mobilen Kommissionierhilfen auftreten. Um dem entgegenzuwirken, muss der Parameter neben der Positionsbestimmung parallel neu bestimmt werden. Die beiden Berechnungen, Positionsbestimmung und Path-Loss Exponent, sind jedoch von einander abhängig und benötigen Werte der jeweils anderen Kalkulation.

Hierzu reduzieren die Autoren die Freiheitsgrade von n , um ihn diskret zu machen. Des Weiteren setzen sie ein *Hidden Markov Model*¹⁴ mit zwei Knoten ein, welches es erlaubt zwischen den Zuständen LOS und NLOS zu unterscheiden. Der Wechsel zwischen den Zuständen findet mit Hilfe eines Partikel-Filters statt. Die Autoren erreichen mit ihrer Vorgehensweise eine Genauigkeit von weniger als 1 m in 85 % der Fälle. Des Weiteren erreicht das System bei drei Bluetoothknoten, von denen lediglich zu zweien Sichtkontakt besteht, ebenfalls gute Ergebnisse.

Das Fingerprinting-Verfahren, wie es bereits in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, ist in der Forschung nicht nur in Verbindung mit WLAN zu finden. Es findet ebenfalls Anwendung in Verbindung mit Bluetooth. Der in „The Horus WLAN location determination system“ [YA05] beschriebene Umstand, dass mit steigender Anzahl von Messungen, die geschätzte Signalstärke der realen deutlich besser angenähert werden kann, führt jedoch das Problem mit sich, dass die korrespondierende Datenbank (Radio Map) sehr schnell anwächst und die Berechnungslaufzeit in die Höhe getrieben wird. Diesem Problem nehmen sich die Autoren Ling et al. in ihrer Veröffentlichung [PCL⁺10] an, indem sie eine Weibullverteilung¹⁵, abgeleitet aus einer kleinen Stichprobe von 20 Messwerten, einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gegenüberstellen, die aus einer Langzeitmessung von ca. 12.000 Messungen besteht. Das Ergebnis in Abbildung 2.2 zeigt, dass mit dieser Methode eine deutlich bessere Approximation geschaffen werden kann, als eine reine vorkommensbasierte Methode anzuwenden. Die zwei Weibullverteilungen (roter und blauer Graph) beschreiben, trotz des großen Unterschieds in der Anzahl der Messungen, einen sehr ähnlichen Verlauf. Die reine vorkommensbasierte Verteilung (grün) hingegen beschreibt einen sichtbar anderen. Hier ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen eines RSSI-Wertes im Bereich 71 ca. fünf mal so hoch. Des Weiteren beschreibt der Verlauf der vorkommensbasierten Verteilung bei der Signalstärke 69 einen sehr steilen Anstieg auf eine Wahrscheinlichkeit von über 10 %, während die beiden Weibullverteilungen an diesem RSSI-Wert einen Rückgang auf eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit von ca. 1 - 2 % verzeichnen.

¹³Non Line of Sight

¹⁴Zustandsmodell dessen Zustände verborgen sind. Über externe Parameter wird versucht auf den aktuellen Zustand des Systems zu schließen. [Dör03, S. 3]

¹⁵stetige, nicht gedächtnislose Wahrscheinlichkeitsverteilung

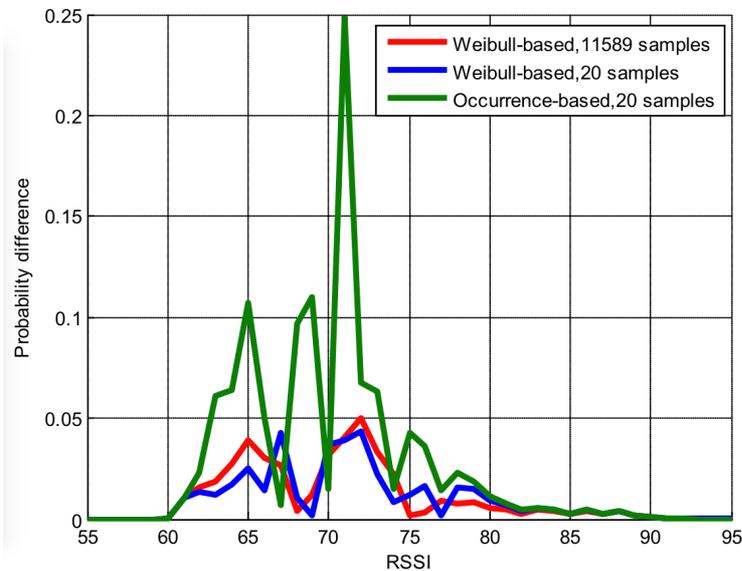


Abbildung 2.2: Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilung aus 20 Messungen im Vergleich zu vorkommensbasierter Verteilung aus 20 Messungen.

Quelle: [PCL⁺10, S. 6]

Die Positionsbestimmung lösen die Autoren, analog dem *Horus*-System [YA05] (vgl. Kapitel 2.1), indem sie die Position mit der höchsten Wahrscheinlichkeit als Standort des Benutzers annehmen. Dies wird mithilfe der *Maximum Likelihood Methode* realisiert.

2.2.2 Bluetooth Low Energy

Eine spezielle Umsetzung der Bluetooth Low Energy Spezifikation mit eigenem Protokoll ist die *iBeacon*-Technologie von *Apple*. In der Theorie ist sie aufgrund ihrer Beschaffenheit in vielfältigen Gebieten einsetzbar. Die Autoren von Wickeren (healt&media GmbH¹⁶) und Wippert (Hochschule Mainz) stellen in ihrer Präsentation ein mögliches Einsatzgebiet der *iBeacons* bei Messen vor, um einerseits Besuchern eine Navigation von ihrem aktuellen Standort zum gewünschten Messestand zu bieten und andererseits Besucherströme messen und auswerten zu können.

Um dies erreichen zu können, werden zwei Ansätze vorgestellt:

1. Referenzbeacons an den Außenwänden der Messehalle
2. Referenzbeacons an den jeweiligen Messeständen

Der erste Ansatz verfolgt die in Kapitel 2.2.1 beschriebene Technik mittels Auswertung der RSSI-Werte auf den räumlichen Abstand zum *i*-ten Beacon zu schließen. Mittels Trilaterationsverfahren wird anschließend die *x*- und *y*-Koordinate bestimmt. Der zweite Ansatz

¹⁶<http://www.health-media.de>

setzt die Kenntnis über die Position der Stände und damit der Funksender voraus. Im Onlinemodus wird ermittelt, zu welchem Stand sich der Besucher am nächsten befindet und ihm anschließend die Position des Standes als eigenen Standort zugeteilt. Diese Methode erreicht in der gegebenen Testumgebung zwar bessere Ergebnisse, hat jedoch auch den Verlust einer Live-Navigation zur Folge, da jeweils nur vom letzten bekannten Punkt aus, nämlich einem Messestand, navigiert werden kann.

Des Weiteren zeigen die Autoren, wie wichtig die Justierung von Sendeleistung und -intervall ist. Es zeigt sich darüber hinaus, dass die maximale Sendeleistung und höchstes Intervall nicht die zuverlässigsten Werte liefert. Stattdessen erreichen die Autoren in ihren Tests die beste Standardabweichung mit einer Sendeleistung von -4 dBm und einem Sendintervall von 300 ms.

Neben Diskussionen zum Thema „Indoor-Positionierung mit iBeacons“, die in Internetforen zu finden sind [Sta15, Quo15], betont Salas [Sal14], dass sich die Radien der Trilateration in der Praxis nicht in einem einzigen Punkt schneiden, sondern eine Fläche von möglichen Positionierungen ergibt. Dies ist auf die Schwankungen der RSSI-Werte zurückzuführen. Aus diesem Grund werden zwei verschiedene mathematische Methoden beschrieben, um die Trilateration trotz fehlendem eindeutigen Schnittpunkt bestmöglich zu lösen. Hierbei liefert die Methode LLSQ (Linear Least Squares) im Vergleich zur Methode NLLSQ (Non Linear Least Squares) die besten Ergebnisse bei gleichzeitig geringerem Rechenaufwand.

Darüber hinaus werden Herangehensweisen erarbeitet, um das Modell für den Signalstärkeverlust (Log-distance Path-Loss Model) zu kalibrieren. Die Wahl der Methode hängt dabei vom zu investierenden Aufwand ab. Bei Anwendung der Punktkalibrierung ergeben sich gute Positionswerte bei gleichzeitig minimalem Aufwand. Die Punktkalibrierung basierend auf dem Näheprinzip der *iBeacon*-Technologie, bei dem nahe jedem Beacon das Modell neu justiert wird, erreicht bessere Ergebnisse als die einfache Punktkalibrierung. Sie ist jedoch auch wesentlich aufwendiger in der Handhabung, da sie n^2 Konfigurationen bei $n \in \mathbb{N}^+$ Beacons benötigt. Umgebungskalibrierungen, die Referenzpunkte ähnlich einer Radio Map in gleichmäßigen Abständen zum Sender erfordern, können einerseits durch schlechte Positionierungsergebnisse nicht überzeugen, andererseits erfordert sie zusätzlich einen sehr hohen Arbeitsaufwand in der Vorbereitungsphase und sind daher ungeeignet.

Neben der Kalibrierung wird ebenfalls ein weiteres Verlustsmodell evaluiert, das ITU Indoor Propagation Model [Ham11]. Dieses berücksichtigt neben den bekannten Parametern des Log-distance Path-Loss Modells auch die Anzahl der Stockwerke, die sich zwischen Sender und Empfänger befinden können. Tests zeigen jedoch, dass die Vorgaben der ITU¹⁷ zur Konfiguration schlechte Ergebnisse liefern. Damit muss es, in gleicher Weise wie das Log-distance Path-Loss Model, mit empirisch ermittelten Werten konfiguriert werden. Allerdings liefert es hinsichtlich der Präzision etwas schlechtere Ergebnisse.

¹⁷International Telecommunication Union, <http://www.itu.int/en>

Weitere Erkenntnisse belaufen sich auf die Platzierung der Bluetooth-Sender. Es kann beobachtet werden, dass sie einen entschiedenen Einfluss auf die Positionierungsergebnisse hat. Um Hinweise für eine hinsichtlich der Genauigkeit gute Positionierung zu erhalten, werden jedoch weitere Untersuchungen vorausgesetzt.

2.2.3 Kommerzielle Systeme

Neben den Systemen, die in der Literatur zu finden sind, haben sich seit der Veröffentlichung der *iBeacon*-Technologie Unternehmen auf die Indoor-Navigation spezialisiert. *Estimote Inc.*, die zusätzlich zertifizierte Hardwarehersteller für *iBeacons* ist [Est14b], hat bereits ein eigenes „Indoor Location SDK¹⁸“ veröffentlicht, das ausschließlich mit den hauseigenen *iBeacons* funktioniert. Es zeichnet sich durch eine sehr einfache Konfiguration in 3 Schritten und hoher Zuverlässigkeit aus. [est14a] Zum Zeitpunkt dieser Arbeit unterstützt das SDK die Navigation in einem Raum, soll allerdings zukünftig auf mehrere Räume ausgeweitet werden:

„At the moment, you can map only individual rooms. It works best in standard rectangular or square-shaped rooms. Future versions will allow for multiple rooms, non-standard shapes, etc.“ [Est14b]

Die *Indoo.rs GmbH*¹⁹ mit Hauptsitz in Österreich hat bereits einen Prototypen ihrer Navigationssoftware im Terminal 2 des Flughafens San Francisco installiert. [ind14] Die Software ist in der Lage, Reisende mit Sehbehinderungen durch das Terminal zu navigieren. Ein Screenshot der Anwendung wird in Abbildung 2.3 dargestellt. Des Weiteren wird

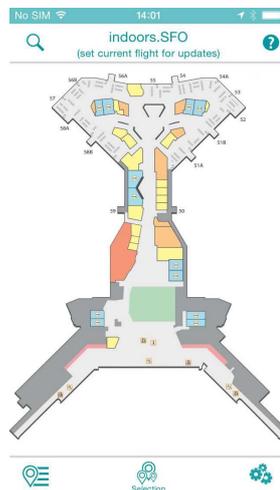


Abbildung 2.3: Screenshot der iOS-Applikation von indoors GmbH zur Navigation im Flughafen San Francisco. Quelle:[ind14]

¹⁸Software Development Kit

¹⁹<http://indoo.rs>

2. VERWANDTE ARBEITEN

Geschäftskunden ein Java-Tool²⁰ zur Verfügung gestellt, das die Einrichtung und Konfiguration der Navigation in Gebäuden ermöglicht. Im Expertenmodus ist es zusätzlich möglich, Messpunkte als Referenzen anzulegen, die zur Verbesserung der Positionierung führen. Zwar unterstützt *Indoo.rs* auch die Navigation mittels WLAN-Netzen, allerdings lässt sich diese mit ihrer Software nicht parallel zur *iBeacon*-Technologie betreiben.

²⁰https://my.indoo.rs/javadoc/mmt_guide

Kapitel 3

Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen der vorliegenden Arbeit erläutert. Hierzu zählen neben der Nennung und Beschreibung des Terminus „Industrie 4.0“ ebenfalls eine Einführung in verschiedene Techniken zur Positionsbestimmung sowie ein ausführlicher Einstieg in die Eigenschaften von Bluetooth Low Energy und der *iBeacon*-Technologie.

3.1 Industrie 4.0

Ende des 18. Jahrhunderts wird mit der Einführung mechanischer Produktionsanlagen die erste industrielle Revolution beschrieben. Die Wende in das 20. Jahrhundert bringt die elektrische Energie und die damit mögliche kostengünstige Massenproduktion. Diese Phase wird als zweite Revolution der Industrie bezeichnet. Seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ist die dritte industrielle Revolution durch den Einsatz von Elektronik und Informationstechnologie gekennzeichnet. Diese helfen dabei die Automatisierung von Prozessen weiter voranzutreiben und effizienter zu gestalten. Die vierte Revolution, die sogenannte Industrie 4.0, ist durch den Einsatz des Internets und die Vernetzung der Maschinen und Anlagen hin zum Internet der Dinge (IoT) maßgeblich gekennzeichnet. [KL11] Aus diesem Grund ist das Thema dieser wissenschaftlichen Arbeit ebenfalls in den Kontext der Industrie 4.0 einzuordnen. Durch die Vernetzung sollen, ähnlich wie in den zuvor stattgefundenen industriellen Revolutionen, wirtschaftliche Vorteile entstehen, da Ressourcen effizienter genutzt werden können.

Der Begriff selbst dient vor allem in Deutschland als Projektname für das von der Bundesregierung initiierte Zukunftsprojekt, das „die deutsche Industrie in die Lage [...] versetzen [soll], für die Zukunft der Produktion gerüstet zu sein“ [BMF15]. Hierzu ist neben der Entwicklung eines intelligenten Monitoring und autonomer Entscheidungsprozesse ebenso der Ausbau der Mensch-Maschine-Interaktion in Anwendungen, die in der Industrie eingesetzt werden, von Bedeutung. [BMF15]

Abbildung 3.1 zeigt, welche Akteure an der intelligenten Fabrik des 21. Jahrhunderts teil haben. Beispielsweise wird dem Logistikunternehmen automatisch mitgeteilt, wann ein Werkstück oder Produkt die Fertigung verlässt, um mit minimaler Verzögerung zur nächsten Fabrik (Gebäude) gebracht zu werden.



Abbildung 3.1: Kommunikation in der Industrie 4.0

Quelle: <http://www.de.paessler.com/blog/2014/06/18/monitoring-news/monitoring-of-things-loesungen-fuer-industrie-40>, Abruf: 25.02.2015

3.2 Positionierungsverfahren

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Positionierungsverfahren beschrieben, deren Unterschiede beleuchtet sowie Vor- und Nachteile herausgearbeitet. Unter dem Begriff wird die grundlegende Idee verstanden, mithilfe bestimmter Informationen, die zu einem gewissen Zeitpunkt zur Verfügung stehen, auf den Standort schließen zu können.

3.2.1 Trilateration

Bei der Trilateration wird per Abstandsmessungen zu drei bekannten Punkten die Position im zweidimensionalen Raum bestimmt. Geometrisch gesehen wird hierbei aus Sicht des Empfängers zu jedem bekannten Punkt der Abstand gemessen und dieser als Radius um den bekannten Punkt gezogen. Die Schnittpunkte aller drei Radien (r_1 , r_2 , r_3) ergeben die gesuchte Position. Schneiden sich die Radien nicht in einem Punkt, ergeben die Schnittpunkte eine Fläche, die als Ergebnismenge gesehen wird (vgl. Abbildung 3.2). Auf Grund von Messungenauigkeiten ist dies in der Praxis ein häufig anzutreffendes Problem.

Sind mehr als drei bekannte Positionen an der Standortberechnung beteiligt, wird das Verfahren Multilateration genannt. Die Abstände können mit folgenden zwei Herangehensweisen gemessen werden.

Zeitmessungsverfahren

Eine Möglichkeit die Position eines Mobilfunkgeräts zu ermitteln, ist die Verwendung von Zeitmessungsverfahren. Hierbei wird zwischen Time-Of-Arrival (TOA) und Time-Difference-

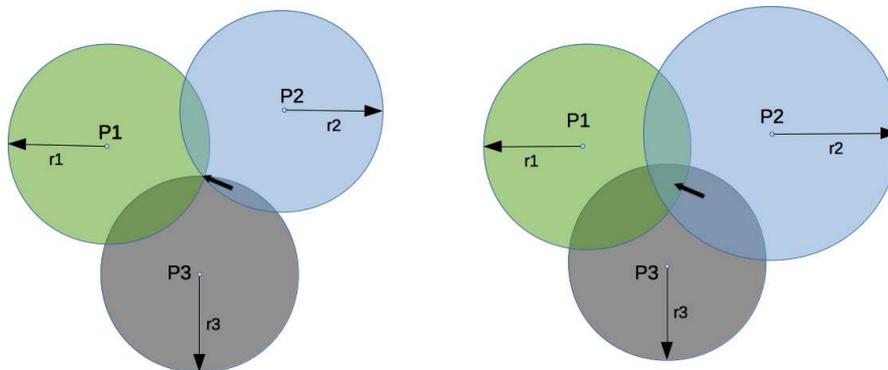


Abbildung 3.2: Geometrische Darstellung des Trilaterationsverfahrens. Links: Die Radien r_1 , r_2 und r_3 schneiden sich in genau einem Punkt, was die Position des Empfängers eindeutig macht. Rechts: Die drei Radien schneiden sich nicht in einem Punkt, sondern spannen eine Fläche auf. Die Position des Empfängers ist damit nicht eindeutig.

Of-Arrival (TDOA) unterschieden. TOA setzt ein absolut synchrones Signal, beispielsweise einen Zeitstempel, voraus. Dieses muss von mindestens drei Basisstationen zu einem absolut präzisen Zeitpunkt an das Mobilfunkgerät gesendet werden. Je weiter die Basisstation vom Empfängergerät entfernt ist, desto mehr Zeit benötigt das Signal bis zur Ankunft am Empfänger. Anhand der Signallaufzeiten und einer bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Berechnung der Entfernungen zu den Basisstationen möglich. [IT-15b]

TDOA basiert, im Gegensatz zu TOA, auf der Messung der Laufzeitunterschiede zwischen Sender und Empfänger. Hierbei wird das Signal vom Mobilfunkgerät an die Basisstationen gesendet und über die unterschiedlichen Ankunftszeiten an den Basen die Position des Senders berechnet. [IT-15a]

Diese Technik mit erhöhten Kosten verbunden, da sie absolut synchron laufende Uhren in den Systemen voraussetzt. [ZP06, ISWL05, S. 2]

Signalstärkemessungsverfahren

Neben der Messung der Signallaufzeit, ist es ebenfalls möglich eine Abstandsmessung auf Grundlage der empfangenen Signalstärke (Received Signal Strength) des Empfängers zum Sender durchzuführen. Da die Signalstärke nur in der Theorie einen quadratischen Abfall verzeichnet, wird hierbei oft auf ein Verlustmodell zurückgegriffen, das die Umrechnung der empfangenen Signalstärke (meist in Dezibel Milliwatt) auf ein metrisches Maß z.B. Meter zulässt. Eine genaue Erläuterung folgt in Kapitel 3.3.

In Kombination mit der zuvor beschriebenen Trilateration kann somit eine Positionsbestimmung durchgeführt werden.

3.2.2 Triangulation

Teilweise als Synonym genutzt, bezeichnet die Triangulation ein grundlegend anderes Konzept zur Positionsbestimmung als die Trilateration. Um die Position eines Objektes im zwei-dimensionalen Raum zu bestimmen, werden die Winkel des Objekts zu bekannten Positionen gemessen und hierüber die eigene Position bestimmt.

Ein Vertreter dieser Verfahrensweise ist Angle-Of-Arrival (AOA), welcher durch den Einsatz spezieller Antennen den Winkel der eintreffenden Funkstrahlen messen und darüber die Position bestimmt. Die Kosten für solche Systeme sind jedoch bedingt durch die besondere Hardware vergleichsweise hoch. [ZP06, S. 2]

3.2.3 Fingerprinting

Das Fingerprinting-Verfahren ist eine Alternative zur Trilateration in der Indoor-Positionierung. Hierbei wird in einer Offlinephase¹ ein Raster von Messpunkten, den sogenannten Fingerprints, erstellt. Ein Fingerprint enthält neben den empfangenen Signalstärken zu bekannten Zugangspunkten die korrespondierende Position, an der dieser erstellt wurde. Alle Fingerprints werden in einer Datenbank, der sogenannten Radio Map, zusammengefasst und in der anschließenden Onlinephase zur Verfügung gestellt.

Ist die gesamte Lokation mithilfe der Fingerprints kartographiert, kann in der darauffolgenden Onlinephase, der eigentlichen Ortsbestimmung, die aktuelle Position bestimmt werden. Hierbei werden die aktuell empfangenen Signalstärken mit denen der Radio Map abgeglichen und versucht, darüber dem Benutzer eine möglichst genaue Position zuzuweisen. Beispielimplementierungen wurden bereits in Kapitel 2 vorgestellt und ausführlich beschrieben, vgl. *RADAR*- und *Horus*-System.

Prinzipiell gilt bei diesem Verfahren, je dichter das Raster desto besser die spätere Genauigkeit des Systems. Allerdings hat sich ein Abstand von unter zwei Metern zwischen den Messpunkten nicht als sinnvoll erwiesen. Eine Unterscheidung zwischen den Fingerprints wird unter diesen Bedingungen sehr aufwändig. [HWJT10]

3.3 Pfadverlust

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, benötigt das Trilaterationsverfahren, das auf Grundlage der Signalstärken den Abstand zum Sender schätzt, ein Verlustmodell. Dieses Modell dient dazu den sogenannten Pfadverlust, die Verringerung der Energiedichte, die eine elektromagnetische Welle bei ihrer Ausbreitung erfährt, abzubilden. Dieser Verlust kann in Indoor-Szenarien folgende Ursachen haben: [Güt14, Poo15]

- Die **Freiraumdämpfung** beschreibt die Abnahme der Signalstärke, ohne dass Hindernisse die Strahlung zwischen Sender und Empfänger beeinflussen. Es besteht demnach ein Sichtkontakt (LOS). Der Grund für die Dämpfung liegt darin begründet, dass die vom Sender ausgestrahlte Energie bei zunehmender Entfernung auf eine immer größer werdende Fläche verteilt wird. [DS12, S. 229]

¹Vorbereitungs- oder Planungsphase.

- Funkwellen breiten sich vom Sender in alle Richtungen aus. Bei Sichtkontakt erreicht die Welle den Empfänger auf direktem Wege. Allerdings kann die Welle auch auf Gegenstände, beispielsweise Wände oder Möbelstück, treffen und von diesen reflektiert werden. Diese **Reflexion** verursacht einen Richtungswechsel der Welle. Dadurch gelangt das Signal des Senders über einen weiteren Weg zum Empfänger. Treffen beide Anteile beim Empfänger aufeinander, kommt es zur Wellenüberlagerung. Diese Überlagerung verändert wiederum die Amplitude der Welle.² [DS12, S. 231 f.]
- Die **Absorption** beschreibt den Effekt, wenn eine Welle auf ein Hindernis trifft, dessen Material für die Welle nur teilweise transparent ist. In diesem Fall kann nur ein Teil der Energie das Hindernis durchqueren, wodurch es zum Verlust kommt. [Poo15] Des Weiteren wird von Absorption gesprochen, wenn die elektromagnetische Welle von einem Objekt nicht vollständig reflektiert werden kann, sondern ein Teil der Energie vom Objekt 'aufgenommen' wird. [Güt14]
- Die **Streuung** einer elektromagnetischen Welle tritt auf, wenn die Welle auf einen Gegenstand trifft, der im Vergleich zur Wellenlänge sehr klein ist. Hierdurch wird die Welle nicht nur in eine Richtung, sondern in alle Richtungen mit gleichen physikalischen Eigenschaften (isotrop) abgestrahlt. Die Energie der abgestrahlten Leistung hängt dabei vom Abstand des Streukörpers zum Sender und der vom Sender verwendeten Sendeleistung ab. [DS12, S. 236 ff.] Im Indoor-Szenario kann die Streuung zum Beispiel durch Staubpartikel hervorgerufen werden.
- Vorausgesetzt ein Gegenstand verhindert den Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger, so kann unter diesen Umständen, bedingt durch ein drittes Phänomen, d.h. ohne Reflexion oder Streuung, hinter dem Gegenstand eine Strahlung gemessen werden. Die sogenannte **Beugung** der elektromagnetischen Welle tritt an der Kante des Hindernisses auf und verursacht die Ausbreitung einer neuen Welle von diesem Punkt aus. Abbildung A.3 in Anhang A verdeutlicht diesen Effekt. [DS12, S. 239]

Die Beschreibung der Reflexion hat bereits gezeigt, dass hierüber das Signal über einen zweiten Weg beim Empfänger ankommen kann und Interferenzen verursacht. In einem realen Szenario spielen häufig mehrere der genannten Phänomene gleichzeitig eine Rolle, die zum Pfadverlust führen können. In diesem Fall kommt das Signal nicht nur über einen zweiten Weg, sondern gleich über viele Wege beim Empfänger an. Dieser Umstand wird als **Mehrwegempfang** bezeichnet. [BA02]

3.3.1 Log-Distance Path-Loss Model

Ein in Indoor-Szenarien oft eingesetzter Vertreter dieser Modelle, der auch Anwendung in dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen System findet, ist das Log-Distance Path-Loss Model [RE09, Ham11, QZX⁺12, Vis13, Sal14]. Das Modell geht davon aus, dass das gemessenen Signalwerte normalverteilt sind und über die Distanz einer logarithmischen Normalverteilung folgen. Die Formel (3.1) beschreibt, wie die Signalausbreitung bzw. die empfangene

²Das Phänomen der Amplitudenänderung bei Wellenüberlagerung wird auch Interferenz genannt.

Signalstärke (RSSI) am Abstand d berechnet werden kann.

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) + X_{\sigma L} \quad (3.1)$$

$P_L(d)$ und $P_L(d_0)$ beschreiben den Pfadverlust an den entsprechenden Abständen d und d_0 , wobei d_0 eine bekannte Referenzdistanz ist. $X_{\sigma L}$ beschreibt die Standardabweichung des empfangenen Signals. Der Parameter n ist der sogenannte Path-Loss Exponent und spielt zur Berechnung des Verlusts eine sehr wichtige Rolle. Wird er schlecht oder gar falsch geschätzt, resultiert dies in schlechten Schätzungen des Pfadverlusts, was wiederum zur Folge hat, dass das Positionierungssystem nicht funktioniert. [RE09]

Um zum Ausgangsproblem, nämlich der Distanzschätzung zum Sender auf Basis von Signalstärken zurückzukehren, muss die gegebene Formel (3.1) zur Verwendung mit RSSI-Werten transformiert werden. Hierbei handelt es sich nicht mehr um einen Verlust, der mit steigender Distanz zunimmt, sondern um eine empfangene Signalstärke die mit steigender Distanz abnimmt.

$$\begin{aligned} P_{TX} - P_{RX}(d) &= P_{TX} - P_{RX}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) + X_{\sigma L} \quad | \quad -P_{TX} \\ -P_{RX}(d) &= -P_{RX}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) + X_{\sigma L} \quad | \quad \cdot(-1) \\ P_{RX}(d) &= P_{RX}(d_0) - 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) - X_{\sigma L} \\ RSSI &= RSSI_0 - 10 \cdot n \cdot \log(d/d_0) - X_{\sigma L} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Formel (3.2) zeigt die Umformung der Formel für den Pfadverlust (3.3) zur Bestimmung der empfangenen Signalstärke (RSSI). Hierbei wird der Pfadverlust zunächst als Differenz zwischen der gesendeten Signalstärke P_{TX} und der empfangenen Signalstärke P_{RX} beschrieben. Anschließend kann P_{TX} auf beiden Seiten der Gleichung eliminiert werden. Wird die daraus resultierende Gleichung mit -1 multipliziert, ergibt sich daraus die Formel für die Berechnung der empfangenen Signalstärke am Abstand d , die gleichbedeutend mit dem RSSI-Werte ist. Anschließend kann die Formel nach d umgestellt werden, um Schätzung der Distanz zu erhalten. Das Ergebnis der Umformung kann in Formel (3.3) eingesehen werden.

$$d = d_0 \cdot 10^{(RSSI_0 - RSSI - X_{\sigma}/10 \cdot n)} \quad (3.3)$$

3.4 Bluetooth Low Energy

Im Jahre 1998 gründeten die Firmen Ericsson, Intel, Nokia, Toshiba und IBM die Bluetooth Special Interest Group (SIG). Im Jahre 2014 zählte die SIG 24.000 Mitglieder, die gemeinsam an der Weiterentwicklung und Verbesserung des Kurzstreckenfunks arbeiten. [Blu15c, Blu15g] Mit Version 4.0 führt die Bluetooth SIG 2010 eine grundlegend neue Bluetooth-Technik ein, die extrem energieeffizient ist und damit die Fähigkeit besitzt über Jahre mit einer Knopfzellenbatterie betrieben zu werden - Bluetooth Low Energy oder Bluetooth Smart. Damit kann die Technologie beispielsweise in Sensoren eingesetzt werden und eröffnet somit eine Reihe neuer Möglichkeiten. Smartwatches können über BLE mit dem reinen Bluetooth Low Energy Sensor (Single-Mode-Device) kommunizieren und übertragen

die Daten anschließend per Bluetooth Classic an den Computer. Geräte, die sowohl über BLE als auch über Bluetooth Classic kommunizieren können, zählen zu den Dual-Mode Geräten. [Blu15a, Blu15c]

Die Reichweite BLE-fähiger Geräte ist durch die Spezifikation selbst nicht begrenzt und kann 60 Meter überschreiten. [Blu15e]

Der geringe Energieverbrauch wird unter anderem durch drei Hauptmerkmale erreicht [HH14]:

1. Geringe Standby-Zeit,
2. Schnelle Verbindungen: Geräte können sich innerhalb 3 Millisekunden verbinden, Daten senden und den Austausch bestätigen,
3. Geringere Auslastung in der Spitze, im Durchschnitt und im Ruhemodus.

BLE ist, vorausgesetzt die Hardware unterstützt es, in Android-Geräten seit Version 4.3 (alias Jelly Bean) [Goo15] und in Apples mobilen Betriebssystem iOS seit Version 5.0 [App14b] mit Einführung des CoreBluetooth Framework verfügbar.

Im Folgenden wird genauer auf technische Eigenschaften der neuen Spezifikation eingegangen. Hierzu dient der Protokollstapel als Leitfaden und Orientierung für die Beschreibung der wichtigsten Ebenen (vgl. Abbildung 3.3). Die unteren drei Ebenen (Physical Layer, Link Layer, Direct Test Mode und Host Controller Interface) gehören zur Controller-Schicht, Logic Link Control and Adaption Protocol bis Generic Access Profile sind der Host-Schicht zugeordnet. Die Ebene Applications vertritt die Anwendungsschicht.

3.4.1 Physical Layer

Die unterste Schicht des Protokollstapels bildet die physikalische Schicht (engl. Physical Layer). Sie ist dafür zuständig Funkwellen zu senden und zu empfangen. Hierfür ist das 2,4 GHz Frequenzband vorgesehen, das zu diesem Zweck in 40 Kanäle unterteilt wird (vgl. Abbildung 3.4). [Blu15f]

- 37 Datenkanäle
- 3 Advertising-Kanäle

Damit teilt sich BLE das Frequenzband mit WLAN, digitalen und kabellosen Hausteletonen und Microwellenöfen. Um dennoch Paketverlust zu vermeiden und neben den anderen Technologien bestehen zu können, kommt das sogenannte Frequency-Hopping zum Einsatz. [Woo13] Dies bedeutet, dass die Daten niemals über einen einzigen Kanal gesendet werden, sondern während des Sendens in sehr kurzen Abständen zwischen den Kanälen gewechselt wird.

In Abbildung 3.4 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Kanäle zum Anbieten der Services (Advertising) strategisch so gut platziert sind, dass sie mit den Kanälen der WLAN-Funktechnik

3. GRUNDLAGEN

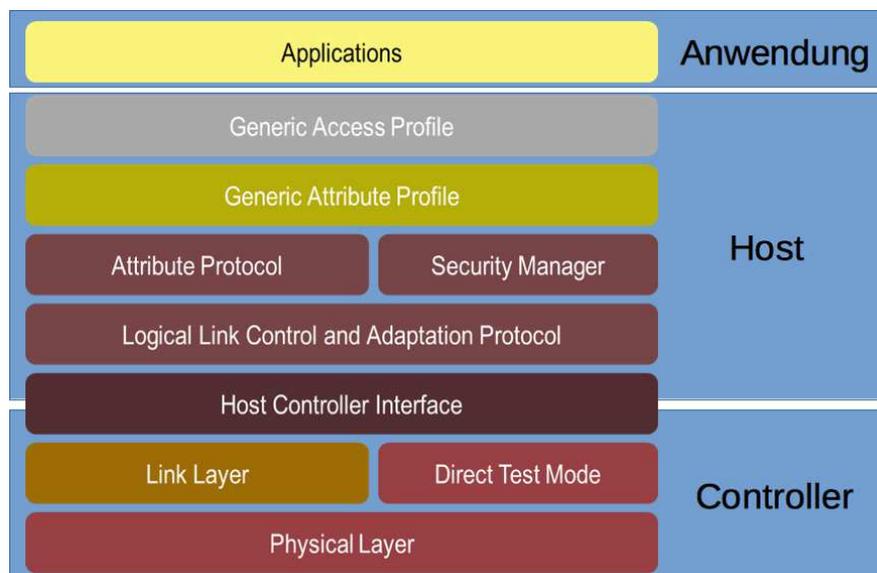


Abbildung 3.3: Bluetooth Low Energy Protokollstapel
 Quelle: [Blu15a], Darstellung durch den Autor um die Bereiche „Controller“, „Host“ und „Anwendung“ erweitert.

nicht konkurrieren. Sie liegen auf den Frequenzen 2402 MHz, 2426 MHz und 2480 MHz. [Blu15f]

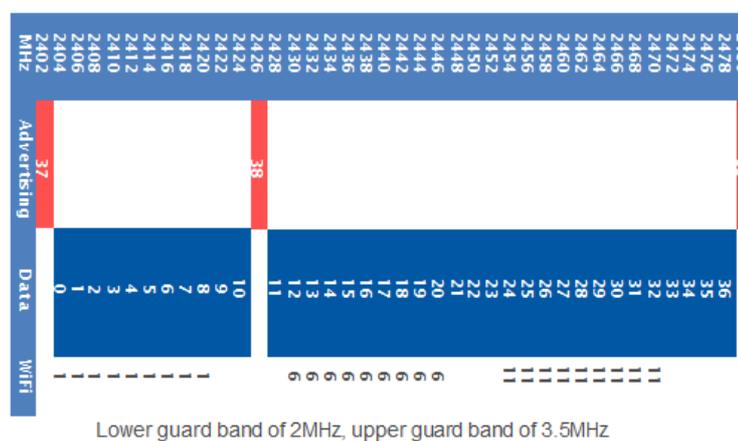


Abbildung 3.4: Verteilung der Daten und Advertising-Kanäle von Bluetooth Low Energy parallel zu WLAN.
 Quelle: [Blu15f]

3.4.2 Link Layer

Zuvor wurde die Funktionsweise der Kommunikation von BLE erläutert. Die nächst höhere Ebene stellt der sogenannte Link Layer dar. Diese ist für den Kontaktaufbau zwischen zwei Geräten verantwortlich. Hierzu ist der aktuelle Zustand der jeweiligen Geräte essenziell. Der Link Layer selbst kann als Zustandsautomat mit den in Tabelle 3.1 beschriebenen Zuständen gesehen werden. Da im Zustand Standby keine Daten gesendet werden,

Zustand	Beschreibung
Standby	In diesem Zustand werden weder Daten gesendet noch empfangen. Der Zustand kann von jedem anderen Zustand erreicht werden.
Advertising	Das Gerät sendet Advertising-Pakete zum freien Empfang, um seine Dienste anzubieten. Advertising kann aus dem Standby-Zustand erreicht werden.
Scanning	Um auf die im Advertising-Zustand ausgesendeten Pakete eingehen zu können, existiert ebenso der Scanning-Zustand. Geräte, die sich in diesem Zustand befinden werden als Scanner bezeichnet. Genau wie der Advertising- kann der Scanning-Zustand aus dem Standby erreicht werden.
Initiating	Befindet sich die Link-Ebene eines Geräts im Initiating-Zustand, so wartet es auf die Advertising-Pakete eines bestimmten Geräts, um anschließend eine Verbindung aufbauen zu können. Erreicht wird der Zustand aus dem Standby.
Connection	Der Connection-Zustand ist der einzige, welcher nicht aus dem Standby erreicht werden kann. Entweder kommt der Link-Layer aus dem Advertising- oder aus dem Initiating-Zustand in eine aktive Verbindung. Der vorangegangene Zustand entscheidet, ob das Gerät in der Verbindung die Rolle des Masters (Initiator) oder des Slaves (Advertiser) einnimmt.

Tabelle 3.1: Zustände inklusive Beschreibung des Link Layers im BLE Protokollstapels.
Quelle: In Anlehnung an [Blu15f, S. 2194]

muss hierfür auch kein Kanal zur Verfügung stehen. Andernfalls werden für das Ankündigen der Services die bereits beschriebenen Advertising-Kanäle und zum Senden der Daten die übrigen 37 Kanäle verwendet. Sucht ein Gerät nach möglichen Verbindungspartnern, so scannt es die Advertising-Kanäle nach möglichen angebotenen Diensten. Wurde ein passender Verbindungspartner gefunden, so agiert eines der Geräte (meist das Smartphone oder Tablet) als Initiator. Der Link Layer kommt in den Connection-Zustand, wenn der Initiator ein *CONNECT_REQ* Paket sendet oder ein „bewerbendes“ Gerät ein *CONNECT_REQ* Paket empfängt.

Je nach vorangegangenem Zustand, kommt der Link Layer in die Master- oder Slave-Rolle des

Connection-Zustandes: Advertising wird zu Slave, Initiator wird zu Master. [Woo13, Blu15f]

Packet Format

Das zuvor angesprochene Advertising und Senden von Nutzdaten unterliegt einem bestimmten Format, das im Folgenden erläutert wird. Allerdings gibt es keine Separation im Format selbst, gleich ob Daten zum Bewerben eines Dienstes oder Nutzdaten gesendet werden. Wie



Abbildung 3.5: Link Layer Packet Format

Quelle: [Blu10, S. 2200]

in Abbildung 3.5 zu sehen ist, besteht jedes Paket aus einer Preamble, einer Zugangsadresse, den eigentlichen Nutzdaten (PDU³) und einer abschließenden Prüfsumme (CRC⁴). Bei einer Mindestlänge von 16 bit der PDU ist die minimale Länge eines gesamten Pakets mit 80 bit definiert.

Die 8 bit lange Preamble dient beispielsweise zur zeitlichen Synchronisation der Verbindungspartner und der automatischen Verstärkungsregelung (AGC⁵), um das eingehende Signal anzupassen. [Blu15f]

Die Zugangsadresse variiert in Abhängigkeit davon, ob es sich um ein Advertising- oder Daten-Paket handelt. Advertising-Pakete besitzen immer die selbe Adresse: 0x8E89BED6. Bei Daten-Paketen hingegen wechselt die Adresse pro aktiver Verbindung zwischen den Link-Ebenen. Der Initiator generiert eine 32 bit lange Zufallsadresse und sendet diese im Paket der Verbindungsanfrage an das Gerät im Advertising-Zustand. [Blu15f]

Ähnlich der Zugangsadresse wird bei den eigentlichen Daten je nach Übertragungsart zwischen Advertising-Kanal und Daten-Kanal unterschieden. In beiden Fällen wird jedoch der PDU ein 16 bit langer Header vorangestellt, der die Art spezifiziert. Des Weiteren gibt er bei Advertising-Kanälen an, um welche Art des „Bewerben“ es sich handelt. Tabelle 3.2 beschreibt die vier möglichen Typen des Advertising. [Blu15f] Der erste Typ, das ungerichtete Advertising ohne die Absicht eine Verbindung zu einem bestimmten Gerät aufzubauen, beschreibt den verbreitetsten Fall. Liegt die Absicht vor, eine Verbindung besonders schnell aufzubauen, kommt das direkte Advertising (ADV_DIRECT_IND) zum Einsatz. Dieses ist jedoch zeitlich begrenzt. Möchte ein Gerät lediglich kleine Daten an alle umliegenden Geräte übertragen (Broadcast) ohne eine aktive Verbindung aufzubauen, kann

³Protocol Data Unit

⁴Cyclic Redundancy Check

⁵Automatic Gain Control

der ADV_NONCONN_IND verwendet werden. [Sal14]

Zustand	Beschreibung
ADV_IND	Ungerichtetes „Bewerben“ zum Aufbau einer Verbindung
ADV_DIRECT_IND	Gerichtetes bzw. direktes „Bewerben“ zum Aufbau einer Verbindung zu einem bestimmten Gerät (zeitlich begrenzt)
ADV_NONCONN_IND	Ungerichtetes „Bewerben“ ohne die Absicht eine Verbindung aufzubauen.
ADV_SCAN_IND	Scannbares, ungerichtetes Advertising

Tabelle 3.2: Typen von Advertising PDUs, in Anlehnung an [Blu15f, S. 2203].

Die bereits angesprochene Prüfsumme wird über die PDU berechnet. Sofern eine Verschlüsselung vorliegt, findet die Erstellung der Prüfsumme nach der Verschlüsselung der Daten statt. [Blu10, S. 2216]

3.4.3 Host Controller Interface

Das Host Controller Interface bildet eine allgemeingültige Schnittstelle zwischen dem Host, also dem Gerät, das die Bluetooth-Funktionalitäten anbieten möchte und dem Bluetooth-Controller selbst. Es stellt dem Host die Möglichkeit zur Verfügung, Befehle an den Controller zu Senden und seine Ressourcen zu nutzen. [Blu15f, Blu15d]

Beispiele für Befehle sind [Blu15d]

- Remote Information: Liefert Informationen zu dem verbundenen Gerät,
- Authentication and Encryption: Erlaubt die Authentifizierung des entfernten Geräts und Verschlüsselung der Verbindung.

3.4.4 Generic Attribute Profile

Kapitel 3.4.2 hat gezeigt, welche Möglichkeiten bestehen, um die Verbindung zwischen zwei Geräten aufzubauen. Allerdings ist noch ungeklärt, woher ein Gerät weiß, dass der potentielle Verbindungspartner genau die Dienste bietet, die gerade benötigt werden. Beispielsweise benötigt eine mobile Anwendung, die auf einem Smartphone läuft, einen Pulsmesser. Um dies zu ermöglichen stellt der Pulsmesser, im folgenden Server, da er Dienste zur Verfügung stellt, ein Profil aus, das alle von ihm zur Verfügung gestellten Dienste bzw. Services beschreibt (vgl. Abbildung 3.6). Diese Services sind wiederum Sammlungen von Charakteristiken, die die eigentlichen Daten des Servers inklusive einer Beschreibung (Descriptor) repräsentieren. Profile dieser Art werden GATT-Profile genannt. [Blu15b] In diesen allgemeingültigen

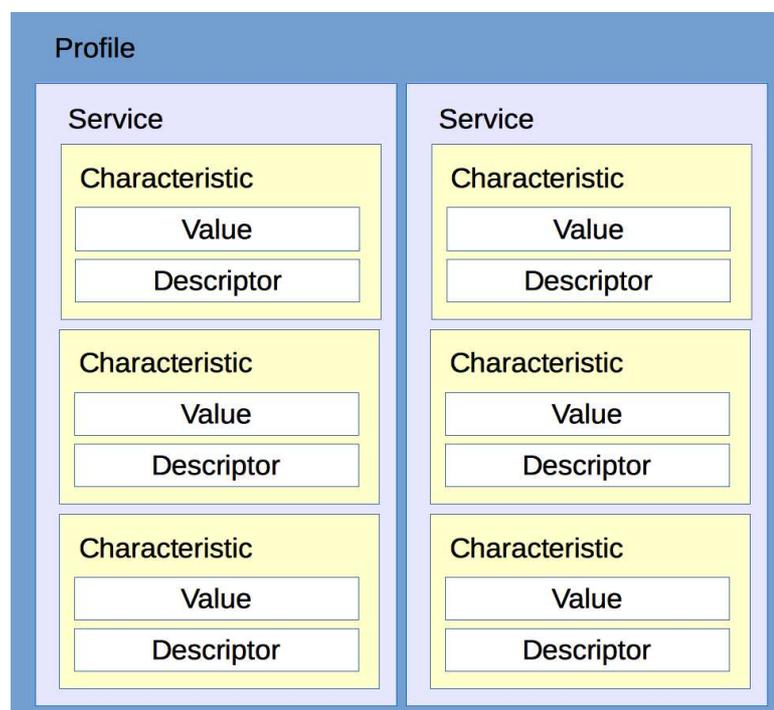


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung eines GATT-Profiles

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [Blu15b]

Profilen hält der Server die Daten für den Client bereit und kann sogar asynchron über vorliegende Änderungen informieren (Notification). Somit steht eine generische Schnittstelle zum Austausch der Daten zwischen Server (Pulsmesser) und Client (Smartphone) zur Verfügung. [Blu15b, Woo13] Jede Art von Kommunikation läuft bei BLE über die GATT-Profile, um strukturiert Daten austauschen zu können. Hierzu wird das darunterliegende Attribute Protocol verwendet. [Blu15a]

Um die Interoperabilität zwischen Geräten weiter zu erhöhen, gibt die Bluetooth SIG für eine Reihe von Anwendungsbereits Profile vor, die in den jeweiligen Geräten verwendet werden können.

3.4.5 Generic Access Profile

Das Generic Access Profile (kurz GAP) liegt im BLE-Protokollstapel direkt über dem zuvor beschriebenen GATT-Profil und kommt beim Entdecken anderer Geräte (Discover), dem Verbindungsaufbau und der Kommunikationsabwicklung, auch hinsichtlich Sicherheitsaspekten, zum Einsatz. Hierzu werden in der Bluetooth Spezifikation [Blu10, S. 1638] vier GAP-Rollen definiert: „Broadcaster“, „Observer“, „Peripheral“ und „Central“. Diese Profilrollen sind wiederum den Zuständen des Link Layers (vgl. Tabelle 3.1) zugeordnet.

Als Beispiel sei die Rolle „Peripheral“ erwähnt, die ein Gerät im Advertising-Zustand übernimmt und bei Zustandekommen einer Verbindung als Slave im Link Layer-Zustand „Connection“ agiert.

3.5 iBeacons

iBeacon ist eine von *Apple Inc.* entwickelte Technologie, um standortbezogene Dienste (auch LBS⁶) komfortabel anbieten zu können. Die Dienste stehen demnach in starker Abhängigkeit zum aktuellen Standort des Benutzers und können darüber kontextsensitive Informationen zur Verfügung stellen. Die Technologie wurde im Jahre 2013 zusammen mit Version 7.0 des Betriebssystems iOS eingeführt und basiert auf dem in Kapitel 3.4 beschriebenen Bluetooth Low Energy. Damit erzielen *iBeacons* die gleichen Vorteile hinsichtlich ihrer Energieeffizienz wie andere Geräte, die auf BLE aufbauen. [App14a, Cis14] Die Lebensdauer der eingesetzten Batterie beläuft sich je nach Konfiguration auf zwei bis drei Jahre. Eine hohe Sendeleistung (Broadcasting Power) gewährt einerseits eine hohe Reichweite des Signals, andererseits wird hierzu mehr Energie benötigt. Eine weitere Konfigurationsmöglichkeit ist das Advertising-Intervall, welches die Häufigkeit zum Senden des Advertising-Pakets definiert. Ein höheres Intervall ermöglicht zwar schnellere Updates und erhöht die Chance, dass ein Client das Paket erhält, allerdings wird hierfür ebenso ein höheres Energieaufkommen benötigt. Spezielle Energieeinstellungen hingegen, können die Dauer auf weitere Jahre erhöhen. [Est14b, Bor14]

3.5.1 Advertising-Kanal

iBeacons agieren, wie der Name bereits vermuten lässt, einem Leuchtturm gleichend. Sie senden ihre Daten als Broadcast in dem zuvor angesprochenen festen Intervall im Advertising-Kanal und bauen hiermit eine virtuelle Region auf. Auf diese Region können wiederum Events registriert werden, um ein Gerät zu benachrichtigen, wenn es den Bereich des Funksenders erreicht oder verlässt (Monitoring). Um die Identifikation einer Region bzw. des Senders selbst gewährleisten zu können, sendet jedes *iBeacon* die in Abbildung 3.7 dargestellten Attribute in der PDU des Advertising-Pakets. Das *iBeacon*-Präfix ist eine vom Protokoll fest vorgegebene ID (02 01 06 1A FF 4C 00 02 15), die den Sender als *iBeacon* identifiziert. [War14] Die UUID⁷ ist ein eindeutiger Bezeichner bezüglich der Anwendung oder des Anwendungsfalls und sollte vom Entwickler festgelegt werden. Alle zu einer bestimmten Handelskette gehörigen *iBeacons* erhalten beispielsweise die selbe UUID. Die Major-ID hingegen bildet eine Subregion aus der Menge der *iBeacons* der selben UUID und kann damit einzelne Geschäftsstellen der Kette abbilden. Es ist etwa möglich einer Geschäftsstelle in Frankfurt die Major-ID 1 und der Geschäftsstelle in Darmstadt die Major-ID 2 zu vergeben. Mit Hilfe der Minor-ID kann diese von Major-ID gebildete Menge von zusammengehörigen *iBeacons* weiter unterteilt werden. [App14a, Cis14]

Das letzte in der Abbildung aufgeführte Attribut „TX power“ (bei *iBeacons* der Firma Estimote auch Measured Power [Puc14] genannt) beschreibt die empfangene Signalstärke in

⁶Location-Based-Services

⁷Universally Unique Identifier

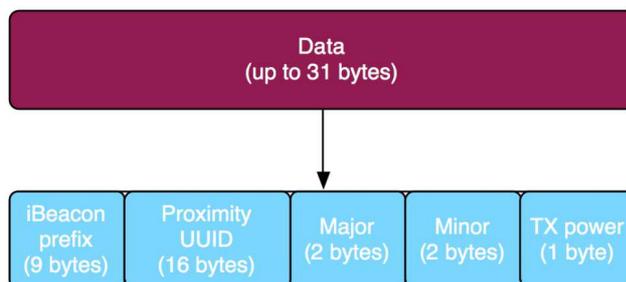


Abbildung 3.7: Aufbau der Advertising-Channel PDU im iBeacon-Protokoll
 Quelle: [War14], Abruf: 28.02.2015

dBm⁸ im Abstand von einem Meter. Dieser Wert ist vom Hardwarehersteller vorkonfiguriert und kann nicht geändert werden.

3.5.2 Abstandsmessung

Zur Abstandsmessung wird die in Kapitel 3.2 angesprochene Signalstärkemessung angewendet. Empfängt ein Gerät die Signale eines *iBeacons* wird die Signalstärke (RSSI⁹) einerseits dazu verwendet die Nähe zum Sender (engl. proximity) festzustellen und andererseits die Genauigkeit dieser Schätzung zu bestimmen (engl. accuracy). Dabei gilt: Je weiter ein Sender vom Empfänger entfernt ist desto geringer der RSSI-Wert. [App14a]

Wie gut eine Abstandsschätzung ist, hängt stark von den äußeren Faktoren ab. Zum einen spielt der echte physische Abstand zum Sender eine große Rolle. Je näher der Empfänger zum *iBeacon* ist desto genauer kann eine Schätzung erfolgen. Des Weiteren können Objekte und Hindernisse im Raum wie Wände, Mobiliar oder Menschen die Signalausbreitung und damit die empfangene Signalstärke am Sender maßgeblich beeinflussen. Abbildung 3.8 verdeutlicht diesen Effekt. [App14a]

Zonen

Die zuvor angesprochenen Regionen werden durch das *iBeacon*-Protokoll in drei Zonen aufgeteilt. Hierdurch kann grob eingeschätzt werden, in welcher Entfernung sich ein Gerät zum Sender befindet (Ranging) und Events können feingranularer ausgelöst werden.

Die Zone 'Immediate' bedeutet, dass sich der Empfänger unmittelbar, in einem sehr geringen Abstand, zum Sender befindet. 'Near' beschreibt eine Zone in einem Radius von 1 m bis maximal 3 m. Ist der Empfänger zu weit von einem Funksender entfernt, um eine genauere Einschätzung vornehmen zu können, oder wird das Signal zu stark gestört bzw. beeinflusst, so wird der Empfänger der Zone 'Far' zugeordnet. [App14a]

⁸Dezibel Milliwatt

⁹Received Signal Strength Indicator

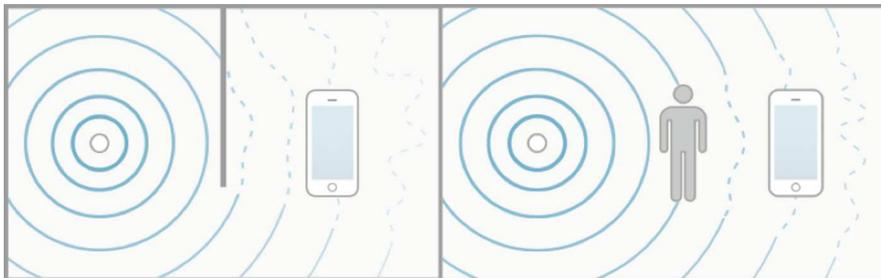


Abbildung 3.8: Gegenstände wie Wände und Mobiliar oder der menschliche Körper stören die Signalausbreitung

Quelle: [App14a], die zwei Abbildungen (Gegenstand Wand und Gegenstand Mensch) wurden durch den Autor zusammengefügt

3.5.3 Software

Obwohl *iBeacons* auf BLE aufbauen, siedelt Apple die Technologie nicht im CoreBluetooth Framework an. Stattdessen erweitert Apple das CoreLocation Framework [App15] um die nötigen Klassen, sodass Beacons, Manager sowie die dazugehörigen Regionen abgebildet werden können.

Dies verdeutlicht, dass es sich bei der Technologie um eine Erweiterung der bestehenden Lösungen zur Standortbestimmung handeln soll. Aus diesem Grund unterliegt die Nutzung von *iBeacons* in einer Anwendung den Vorkehrungen herkömmlicher Standortzugriffe zum Schutze der Privatsphäre, wie sie bei GPS bekannt ist. Hierzu muss der Anwendungsentwickler über die Methode `requestWhenInUseAuthorization` der Klasse `CLLocationManager` die Erlaubnis beim Benutzer einholen. [nev14]

Trotz alledem stellt Apple heraus, dass es sich bei *iBeacons* um keine Technologie handelt, die zur präzisen Feststellung des Benutzerstandorts konzipiert wurde. Folgendes Zitat verdeutlicht, dass es sich vielmehr um eine Standortbestimmung mit der Genauigkeit im Raumgrößenbereich handelt, die zusätzlich einer Reihe von Überlegungen bedarf, um erfolgreich eingesetzt werden zu können:

Due to the issues around signal strength and the variabilities in deployment environments, iBeacon technology is not intended to be used for specific location identification. It should be capable of providing room-level accuracy, but there are many factors that need to be considered to build a successful deployment. [App14a]

Kapitel 4

Problemanalyse und Zwischenfazit

Dieses Kapitel dient zur genaueren Problemanalyse sowie einem Zwischenfazit der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Verfahren und Techniken. Es folgt eine begründete Auswahl derselbigen auf Grundlage der in Kapitel 2 und 3 gewonnenen Erkenntnisse.

4.1 Analyse

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, soll mit Hilfe einer Indoor-Navigation die Lagerverwaltung effizienter gestaltet werden. Das System wäre in der Lage dem Mitarbeiter den kürzesten Weg zu einem oder mehreren Lagerplätzen anzuzeigen und eine entsprechende Navigation durchzuführen. Das ist sowohl bei der Einlagerung der Ware als auch beim Kommissionieren von großer Bedeutung, um Zeit und damit Kosten einzusparen. Zur Realisierung muss das Gesamtproblem der Indoor-Navigation in Teilprobleme aufgeschlüsselt werden:

1. Positionsbestimmung im Gebäude
2. Routenplanung
3. Navigation von Punkt A nach Punkt Z über Punkt B, C, ...

Die Grundlage jeder Navigation bildet die Positionierung. Ohne 'automatischer' und möglichst exakter Standortbestimmung muss der Benutzer stets eigenständig seinen Standort in das System eingeben, was zum Verlust der Bedienbarkeit des Systems führt. Das als zweites aufgeführte Teilproblem, die Routenplanung, dient dazu im Falle der Kommissionierung den kürzesten Gesamtweg zu berechnen, um alle Produkte einer Bestellung zusammenzustellen. Hierzu muss der zuvor ermittelte, aktuelle Standort als Startpunkt verwendet werden. Eine willkürliche Wahl des Startpunktes ist nicht zielführend. Die Navigation baut hingegen auf der Positionierung sowie der zuvor erfolgten Planung der Route auf, indem sie den aktuellen Standort dazu verwendet, um Entscheidungen über einen Richtungswechsel (Abbiegen) zu treffen.

Das Problem der Routenplanung ist in der Literatur unter dem Namen *Traveling Salesman Problem* (TSP) [ABCC11] bekannt und wird erstmals 1930 erwähnt. Es beschreibt die

Problematik eines Handlungsreisenden, die kürzeste oder günstigste Route zu finden, um zuvor festgelegte Städte zu besuchen und anschließend an den Ausgangspunkt zurückzukehren. Die Reihenfolge, in der die Städte besucht werden, wird 'Tour' genannt. Bezogen auf den Anwendungsfall des Warenlagers werden die Städte durch Lagerplätze ersetzt, da jedes Produkt einer Bestellung, je nach Lagerhaltung¹, mindestens einem Lagerplatz zugeordnet ist. Abbildung 4.1 stellt dieses Szenario abstrakt dar. Das 'Depot' bildet Start- und Zielpunkt, ausgefüllte Quadrate zeigen anzulaufende Lagerplätze an und die gestrichelten Pfeilverbindungen, in einer bestimmten Reihenfolge kombiniert, ergeben die Tour durch das Lager.

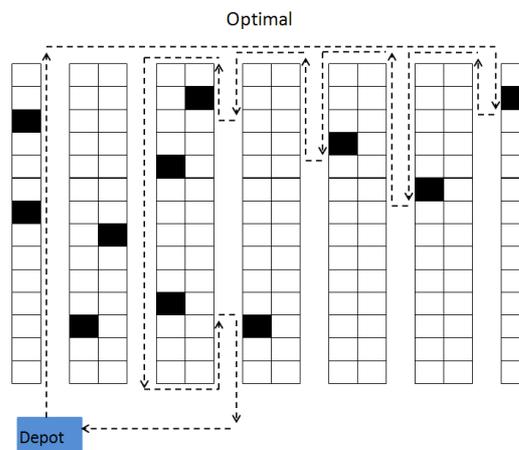


Abbildung 4.1: Anwendung des *Traveling Salesman Problem* im Warenlager.

Quelle: [MB12]

Das TSP lässt sich zwar anschaulich erläutern, eine effiziente Lösung ist hingegen nicht trivial. Dennoch bringt die Forschung eine Reihe von Lösungen zur Berechnung des Problems hervor. [Lin65, Rei94, ZL09, ABCC11] Eine davon ist der Algorithmus Nearest Neighbour, der in abgewandelter Form bereits in Kapitel 3 im Rahmen des *RADAR*-Systems angesprochen wird. Dieser beginnt bei einem festen Startpunkt p_1 und sucht den nächstgelegenen Knotenpunkt p_2 . Ist dieser gefunden, wird beginnend von p_2 erneut der nächste Knotenpunkt p_3 gesucht, der sich von p_1 und p_2 unterscheidet ($p_3 \neq p_1 \neq p_2$). In dieser Weise fährt der Algorithmus fort, bis alle Knotenpunkte besucht wurden. [GYZ02]

Wie bereits erwähnt, ist die Navigation ein Zusammenschluss der Informationen, die aus der aktuellen Position und der Routenplanung hervorgehen. Durch diese Kombination entsteht neues Wissen, das dazu verhilft, die zuvor geplante Route erfolgreich zu absolvieren. Sie ist zwar essentiell zur Erreichung des Gesamtziels, erfährt jedoch hier keine explizite wissenschaftliche Untersuchung und wird in der vorliegenden Arbeit lediglich theoretisch behandelt. Das erstgenannte Teilproblem, die genaue Positionsbestimmung im Gebäude, ist

¹Bei der chaotischen Lagerhaltung, kann ein Produkt an mehreren Lagerplätzen eingelagert werden. Je nachdem wo gerade ein Freiraum besteht. Die Festplatzzuordnung sieht einen dauerhaft zugewiesenen Lagerplatz pro Produkt vor.

ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet, das besonders in dynamischen Umgebungen weiteren Untersuchungen bedarf. Die WLAN-basierte Warenverfolgung in Abschnitt 2.1.1 hat gezeigt, dass hinsichtlich der Positionierungsgenauigkeit von 3,25 m als auch in Bezug auf die Updategeschwindigkeit von 150 s, in welchem Intervall neue Positionsbestimmungen möglich sind, Forschungsbedarf besteht. Des Weiteren wird von den Autoren betont, dass keines der getesteten Systeme die im Warenlager vorherrschende Dynamik abbilden kann.

Die Lager, welche bei der Bearbeitung der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind, haben folgenden Eigenschaften. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen, wird von Warenlagern ausgegangen, die eine rechteckige Grundfläche aufweisen. Die Regale stehen parallel zu einander und haben eine Länge von 10 m. Die Gangbreite hingegen beläuft sich auf ca. 2 m. Der gesamte Kommissionierungsprozess wird zu Fuß unter Zuhilfenahme von Kommissionierwagen durchgeführt, die zum Ablegen der Ware dienen und größeren Einkaufswagen ähneln. Da davon ausgegangen werden kann, dass die einzelnen Lagerplätze eine Breite zwischen 0,5 m und 1,0 m aufweisen, kann der Prozess bereits effizienter gestaltet werden, wenn ein Kenntnis über die aktuelle Position in Abschnittsgenauigkeit vorliegt. Die Tiefe der Regale kann ebenfalls mit 0,5 m bis 1,0 m angegeben werden. Eine Kommissionierung startet und endet in der Regel an einem fest vorgegebenen Punkt im Lager, der in der Abbildung durch ein S gekennzeichnet ist. Hier befinden sich Vorrichtungen zum Verpacken der Ware in Pakete und dem Druck der Versandetiketten.

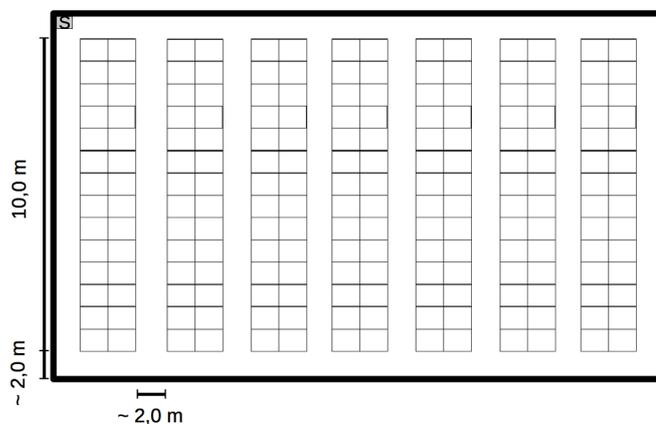


Abbildung 4.2: Lagermodell mit rechteckiger Grundfläche, einer Gangbreite von ca. 2 m, einer Ganglänge von 10 m und einem festen Startpunkt.

4.2 Zwischenfazit

Wie bereits beschrieben, greifen die Systeme in der Publikation der Autoren Ibach et. al [ISWL05] auf die im Lager installierten WLAN Access Points (AP) zu. Hierbei muss eine Positionsbestimmung auf Grundlage von Signalstärken berechnet werden, die durch Lagerregale und die darin liegende Ware einer unbekanntenen Dämpfung unterzogen wird. In seltenen

Fällen besteht ein Sichtkontakt zu den Sendern, wodurch es mit vertretbarem Aufwand nicht möglich ist, in solch dynamischen Umgebungen ein Modell für die Signalausbreitung zu bestimmen. Die Berechnung des Pfadverlusts wird somit ebenfalls erschwert. Ein Sichtkontakt zu genannten Access Points könnte erreicht werden, indem die Dichte von Access Points, beispielsweise drei APs pro Lagergang, erhöht wird. Dieser Ansatz ist jedoch mit hohen Kosten verbunden, da die Hardware gekauft und in das Netzwerk eingebunden werden muss. Hierzu zählt neben der Installation des Netzkabels auch die Konfiguration von IP-Adressen, Funkkanal und Zugangssicherung. Des Weiteren ist eine Elektroinstallation erforderlich, um die APs mit elektrischem Strom versorgen zu können. Neben den Fixkosten erhöhen sich ebenfalls die laufenden Kosten bedingt durch den höheren Energiebedarf.

Parameter	Wert
Energiekosten	22 Cent / Kilowattstunde
Leistungsaufnahme / Access Point	20 Watt
Stunden / Jahr	8760 h
Anzahl Access Points	30

Tabelle 4.1: Definition der Parameter zur Berechnung der Energiekosten für die Access Points im definierten Beispiellager.

Tabelle 4.1 definiert die Parameter für eine beispielhafte Energiebedarfsrechnung. Hierbei wird von einer Leistungsaufnahme von ca. 20 Watt pro AP ausgegangen und eine Kilowattstunde mit 0,22€ berechnet. Wird das in Abbildung 4.2 dargestellte Lager als Beispiel herangezogen, müsste der Bedarf an APs bei ungefähr 30 Stück angesetzt werden. Hierdurch wäre es zumindest möglich an jeder Position zu mindestens drei Access Points die Signalstärke messen zu können, ohne dass diese durch die Ware und Lagerregale beeinflusst werden würde. Bei 8760 Betriebsstunden im Jahr und den gegebenen Werten aus Tabelle 4.1 belaufen sich die Kosten für den Energiebedarf auf 1156,32€/Jahr (vgl. Gleichung (4.1)). Des Weiteren könnte es bei einer zu großen Anzahl von APs zu Einwahlproblemen in das Netzwerk und damit zu Verbindungsabbrüchen kommen, da das Endgerät in sehr kurzen Abständen die Zugangspunkt ändern muss.

$$\begin{aligned}
 8760 \text{ h} \cdot 0,02 \text{ kW} &= 175,2 \text{ kWh} \\
 175,2 \text{ kWh} \cdot 0,22 \text{ €/kWh} &= 38,54 \text{ €} \\
 38,54 \text{ €} \cdot 30 &= 1156,32 \text{ €}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Weiter hat Kapitel 3.5 gezeigt, dass *iBeacons*, bedingt durch den BLE-Standard, eine günstige und energieeffiziente Alternative darstellen. Sie sind nicht an den Netzbetrieb gebunden, sondern werden über eine Knopfzelle betrieben, die das Beacon mehrere Jahre mit Strom versorgen kann. Hierdurch entfällt bei Einsatz der Technologie eine Elektroinstallation, Installation von Netzkabeln und die Energiekosten können stark reduziert werden. Die Erhöhung der Senderdichte bzw. der gesamte Installationsprozess im Lager

wird auf diese Weise enorm vereinfacht. Ferner ist die Technologie noch sehr jung und besonders hinsichtlich der Indoor-Positionierung wenig erforscht. Allein aus diesem Grund bedarf es weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen und der Erforschung von möglichen Einsatzgebieten.

Die Literaturrecherche in Kapitel 2 sowie die Betrachtung der Grundlagen in Kapitel 3 haben zwei verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Position im Gebäude auf Basis der empfangenen Signalstärke beschrieben. Das Fingerprinting-Verfahren (vgl. Abschnitt 3.2.3) erwartet ein Raster von Referenzpunkten, die sich über das komplette Areal erstreckt. Bei einem Abstand von ca. 2 m zwischen den Fingerprints steigt die Anzahl der benötigten Referenzpunkte, um ein komplettes Lager kartographieren zu können, schnell an. Je nach Größe des Warenlagers ist damit ein hoher Arbeitsaufwand bei der erstmaligen Kalibrierung verbunden. Das Laterationsverfahren in Verbindung mit einer Punktkalibrierung, wie es in [Sal14] beschrieben wird (vgl. Abschnitt 2.2.2), benötigt hingegen einen Bruchteil der Referenzpunkte und ist damit in der Einrichtung und in der Wartung kostengünstiger. Dies spiegelt sich allgemein in einem geringeren Aufwand wieder.

Auf Grundlage der zuvor genannten Argumente kommen für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit folgende Technologie und Verfahrensweisen zum Einsatz:

- *iBeacons* als Funksender,
- (Tri-)Lateration auf Basis der empfangenen Signalstärke,
- LOS zu möglichst vielen Sendern, um den Pfadverlust genau schätzen zu können.

Kapitel 5

Estimote Indoor Location

Für die Bearbeitung der vorliegenden Arbeit kommt Hardware der Firma *Estimote Inc.* zum Einsatz. Der Abschnitt Kommerzielle Systeme (2.2.3) hat bereits kurz dargelegt, dass *Estimote*, neben der Herstellung zertifizierter *iBeacon*-Hardware, eigene Software für die Entwicklung zur Verfügung stellt. Diese wird in zwei verschiedenen Formen bereitgestellt:

1. Smartphone App: Anwendung für die Plattformen iOS ab Version 7.0¹ und Android ab Version 4.3² [Ste14]
2. Software Development Kit
 - a) Estimote SDK (iOS und Android)
 - b) Indoor Location SDK (iOS)

In der Smartphone Applikation sind drei kleine Testanwendungsfälle ('Proximity Demo', 'Notify Demo' und 'Distance Demo') integriert, die den Einstieg in die Arbeit mit *iBeacons* erleichtern und deren Funktionalität demonstrieren. 'Proximity Demo' scannt die Umgebung nach Sendern in Reichweite und zeigt beim Aktivieren eines gefundenen Beacons über die Benutzeroberfläche die zugehörigen Beispielangebote, wie der Schlussverkauf von Schuhen oder Ähnlichem, an. Die Beispielanwendung 'Notify Demo' geht einen Schritt weiter und erlaubt die Registrierung von Events zu einem Sender. Hierzu wird der Benutzer nach Wahl eines Beacons dazu aufgefordert sich ca. 20 m vom Beacon zu entfernen und sich anschließend in einem normalen Tempo wieder zu nähern. Befindet sich der Benutzer wieder in unmittelbarer Umgebung des *iBeacons*, bekommt dieser eine Push-Benachrichtigung mit dem Hinweis „You are near the same shoes again!“. Der Anwendungsfall 'Distance Demo' zeigt nach Wahl eines in der Umgebung liegenden Senders, wie weit sich der Benutzer von diesem entfernt befindet. Kapitel 3.5 hat bereits gezeigt, dass dies nur eine grobe Näherung ist, die von vielen Faktoren abhängt. Visualisiert wird die Entfernung mit Hilfe der bekannten Zonen 'Immediate', 'Near' und 'Far'.

¹<https://itunes.apple.com/de/app/estimote/id686915066>

²<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.estimote.apps.main>

Die Version für iOS bringt ebenfalls eine Funktionalität zum Testen des Indoor Location SDKs mit, welches *Estimote* speziell zur Umsetzung von Indoor-Navigtionen entwickelt hat. Hierzu werden für die Anwendung mindestens vier *Estimote*-Beacons benötigt. Die Testanwendung führt den Benutzer mit Hilfe eines Assistenten durch die Einrichtung des Raumes. Nachdem die vier Sender jeweils in der Mitte jeder Wand in Brusthöhe platziert sind, kann durch Ablaufen der Raummaße die Größe und der Schnitt des Raumes ermittelt werden. Dies funktioniert sehr wahrscheinlich unter Verwendung des Beschleunigungssensors und einer Zeitmessung³. Des Weiteren muss beim Passieren jedes Beacons angehalten und das Smartphone direkt neben dem Sender platziert werden. Hierdurch wird die Position und Ausrichtung desselbigen registriert. Der genaue Ablauf kann in Anhang B als Flussdiagramm eingesehen werden. Der gesamte Prozess hat sich in der Praxis als schwerfällig und unzuverlässig in der Präzision erwiesen. Teilweise wird nach Abschluss der Raumeinrichtung auf einen unbekanntem Fehler hingewiesen und der Prozess muss von vorne gestartet werden. Darüber hinaus weisen die ermittelten Raummaße in einigen Testmessungen Abweichungen von mehr als 0,5 m pro Wandlänge auf, was in der späteren Onlinephase neben den bereits genannten Faktoren eine weitere Fehlerquelle darstellt.

Aus diesem Grund wird in der weiteren Bearbeitung und zur Evaluation der eigentlichen Software zur Lokalisierung ein eigener Prototyp auf Basis des Software Development Kits entwickelt. Hierbei ist es möglich die Raumbeschreibung unter Verwendung einer JSON-Struktur manuell anzulegen. Dies erfordert zwar einen höheren Arbeitsaufwand, da Raummaße und die Positionen der Beacons per Hand ausgemessen und anschließend in die JSON-Struktur eingepflegt werden müssen, ist im Zuge dessen jedoch sehr genau.

Die folgenden Kapitel bieten einen detaillierten Einblick in die Entwicklung mit dem Indoor Location SDK, dessen Funktionalität sowie eine ausführliche Evaluation der Genauigkeit hinsichtlich der gelieferten Positionierungen. Hierzu werden zwei Testszenarien entwickelt und herangezogen, die sich sowohl in der Größe als auch im Mobiliar unterscheiden. Die Evaluation liefert eine Entscheidung über den möglichen Einsatz der Software im Warenlager.

5.1 Indoor Location SDK

Dieser Abschnitt bietet einen Einblick in das zuvor angesprochene SDK zur Indoor-Navigation (Version 2.4) der Firma *Estimote Inc.*. Um Missverständnissen vorzubeugen sei an dieser Stelle erwähnt, dass zwei verschiedene SDKs zur Verfügung stehen (vgl. Punkt 2 a) und b)). Auf der einen Seite wird das 'Estimote SDK' bereitgestellt, das einen Wrapper um *Apples* Core Location Framework mit einigen Zusatzmethoden für den speziellen Umgang mit *Estimote*-Beacons bietet. Es ist sowohl für iOS⁴ als auch für Android⁵ verfügbar. Auf

³Mittels Weg-Zeit-Gesetz kann durch Angabe der Beschleunigung und der Zeit die zurückgelegte Strecke berechnet werden.

⁴<https://github.com/Estimote/iOS-SDK>

⁵<https://github.com/Estimote/Android-SDK>

der anderen Seite existiert das 'Indoor Location SDK'⁶, das im Folgenden die zentrale Rolle spielt. Es wird zum Zeitpunkt dieser Arbeit ausschließlich für das Betriebssystem iOS angeboten. [Est15a]

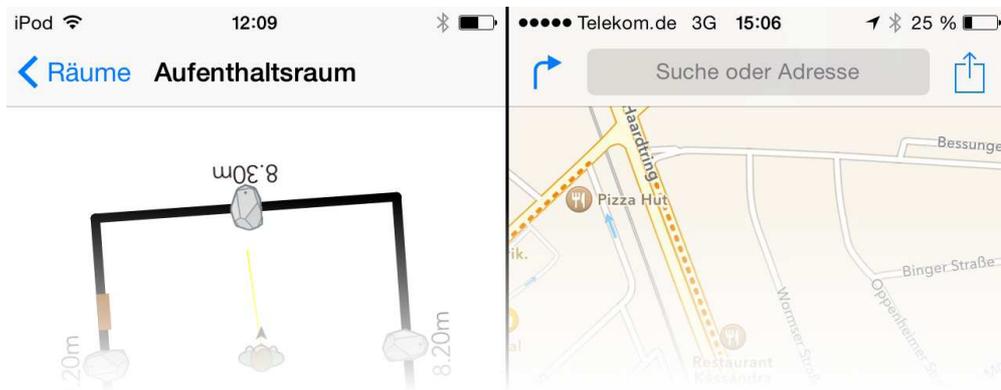


Abbildung 5.1: Links: Bei Verwendung des Indoor Location SDKs findet keine Kommunikation über das Core Location Framework statt (keine Kompassnadel in der oberen Leiste). Stattdessen läuft die komplette Interaktion über das Core Bluetooth Framework. Rechts: Kompassnadel erscheint in der rechten oberen Ecke neben dem Bluetoothsymbol, da Apple Maps den aktuellen Standort des Benutzers verwendet.

Eine weitere Besonderheit ist, dass zur Umsetzung nicht das von *Apple* vorgesehene Core Location, sondern Core Bluetooth Framework verwendet wird. Dies ist daran zu erkennen, dass unter iOS ein Kompassnadel-Symbol in der oberen Leiste auftaucht, sobald eine App auf den aktuellen Standort zugreift. Schnittstellen zum Standort werden über das Core Location Framework zur Verfügung gestellt. [App15] Wie Abbildung 5.1 zeigt, ist dies jedoch bei der Programmierung mit dem Indoor Location SDK nicht der Fall. Stattdessen erscheint lediglich das Bluetooth-Symbol. Dies hat zwar zur Folge, dass sich die Kompatibilität lediglich auf *Estimote*-Beacons beschränkt, wohingegen das Updateintervall des Ranging-Events, das seitens *Apple* auf 1 Hz beschränkt ist, umgangen werden kann. Hierdurch ist es *Estimote* mit dem empfohlenen Advertising-Intervall von 200 ms möglich mit einer Frequenz von 5 Hz ein Update zu liefern. Daneben wird darauf hingewiesen die Sendeleistung auf +4 dBm einzustellen.

Das Ziel *Estimates* ist es, mit der Software Anwendungsentwicklern die volle Kontrolle über 'Proximity' und die Position im Raum zu geben, ohne dass diese sich in die dahinterliegende Mathematik und Formeln zur (Tri-)Lateration einarbeiten müssen. [Inc15, Est15a] Hierzu finden neben der *iBeacon*-Technologie weitere Hardwarekomponenten Anwendung im Positionierungsprozess, um die relative Bewegungsdistanz und die Nähe zu verschiedenen Beacons messen zu können. [Inc15] Zwar ist die Positionsbestimmung in der aktuellen Version nur in rechteckigen Räumen mit mindestens einem Beacon pro Wand möglich, die

⁶<https://github.com/Estimote/iOS-Indoor-SDK>

Genauigkeit soll dabei allerdings bei 0,5 m bis 1,0 m liegen - abhängig von der Beschaffenheit der Umgebung und der Konfiguration. [Est15a]

Zur Installation wird ein Cocoa Pod⁷ zur Verfügung gestellt, der einen einfachen Einsatz des SDKs in der Entwicklungsumgebung Xcode ermöglicht. Diesbezüglich muss lediglich eine Textdatei mit dem Inhalt `pod 'EstimoteIndoorSDK'` im Wurzelordner des Xcode-Projekts angelegt werden. Anschließend wird das SDK über das Terminal mit dem Befehl `$ pod install` installiert. Damit Xcode im Folgenden alle Abhängigkeiten erkennt und die benötigten Klassen importiert werden können, muss die vom Cocoa Pod angelegte alternative Xcode-Projektdatei mit der Endung `.xcworkspace` geöffnet werden.

5.1.1 Wichtige Klassen und Methoden

Dieser Abschnitt beschreibt die wichtigsten Klassen und Methoden zur Programmierung mit dem Indoor Location SDK. Die folgenden Erläuterungen orientieren sich an dem in Anhang B.2 dargestellten Codeausschnitt.

Die Hauptschnittstelle zum Framework bildet die Klasse `ESTIndoorLocationManager`. Von ihr wird nur ein Objekt pro Anwendung instanziiert (Singleton). Des Weiteren muss ihr, damit die Anwendung Positionsupdates verarbeiten kann, eine Klasse zugewiesen werden, die das `ESTIndoorLocationManagerDelegate` Protokoll implementiert. Ein Delegate ist ein spezielles Entwurfsmuster, um Daten asynchron verarbeiten zu können. Es bietet in diesem individuellen Anwendungsfall zwei Methoden zur Verarbeitung an: [Est15b]

- `(void)indoorLocationManager:(ESTIndoorLocationManager *)manager didFailToUpdatePositionWithError:(NSError *)error`
- `(void)indoorLocationManager:(ESTIndoorLocationManager *)manager didUpdatePosition:(ESTOrientedPoint *)position inLocation:(ESTLocation *)location`

Die erste Methode wird vom Framework im Fehlerfall aufgerufen und liefert neben dem Manager-Objekt, das die Lokation verwaltet, ein Fehler-Objekt vom Typ `NSError` zurück. Die Parameter der zweiten Methode werden neben der berechneten Position durch die zugehörige Lokation (`ESTLocation`) und dem LocationManager-Objekt (`ESTIndoorLocationManager`) abgebildet. Die Position ist vom Typ `ESTOrientedPoint` und hält als Attribute neben x- und y-Koordinaten auch die Orientierung des Geräts. [Est15b] Abbildung 5.2 beschreibt diese Orientierung als Winkel im Gradmaß zwischen dem Vektor $\vec{v} = (0, 1)$ und dem magnetischen Norden. Die Messung findet hierbei im Uhrzeigersinn statt.

Die Klasse `ESTLocationBuilder` ermöglicht es, die zuvor angesprochene Lokation zu instanziiieren. Listing 5.1 zeigt, wie dies programmatisch mithilfe der Methode `setLocationBoundaryPoints` umgesetzt wird. Hierzu findet eine Übergabe der Objekte der Klasse

⁷<http://cocoapods.org/>, Dependency Manager ähnlich Maven für Java oder Composer für PHP

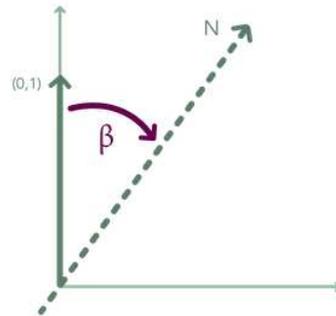


Abbildung 5.2: Bildliche Darstellung der Orientierung eines Geräts im Indoor Location Framework. Die Orientierung ist definiert als Winkel zwischen dem Vektor (0, 1) und dem magnetischen Norden.

Quelle: <https://github.com/Estimote/iOS-Indoor-SDK/blob/master/ReadmeImages/Orientation.png>, Abruf: 04.03.2015

ESTPoint als Array statt, welche die Eckpunkte des Raumes definieren. Anschließend ist es möglich mit den entsprechenden Methoden die Orientierung (Zeile 7) sowie die Positionen der Beacons (Zeile 9) zu definieren. Die Zuweisung der Position wird mit der Methode addBeaconIdentifiedByMac realisiert, die pro Beacon aufgerufen werden muss. Abschließend wird aus den zuvor gesetzten Parametern eine valide Lokation erstellt (build).

```

1  ESTLocationBuilder *locationBuilder = [[ESTLocationBuilder new];
2
3  [locationBuilder setLocationBoundaryPoints:@[
4      [ESTPoint pointWithX:0 y:0],
5      [ESTPoint pointWithX:0 y:6],
6      [ESTPoint pointWithX:6 y:6],
7      [ESTPoint pointWithX:6 y:0]];
8
9  [locationBuilder setLocationOrientation:0];
10
11 [locationBuilder addBeaconIdentifiedByMac:@"d79d52eb20c7"
12     atBoundarySegmentIndex:0 inDistance:2 fromSide:ESTLocationBuilderLeftSide];
13 ...
14
15 ESTLocation *location = [locationBuilder build];

```

Listing 5.1: Die Methode setLocationBoundaryPoints der Klasse ESTLocationBuilder wird dazu verwendet einen quadratischen Raum anzulegen. Anschließend werden die Positionen der Beacons definiert.

Eine weitere Möglichkeit eine Lokation anzulegen, ist die bereits angesprochene JSON-Struktur. Listing B.1 in Anhang 5 zeigt die Struktur für den Aufenthaltsraum bei VIISON. Befindet sich die JSON-Datei im Projektverzeichnis, kann sie mit den folgenden drei Zeilen geladen und daraus eine ESTLocation instanziiert werden.

```

1  NSString *path = [[NSBundle mainBundle] pathForResource:@"aufenthaltsraum"
2     ofType:@"json"];
3  NSString *content = [NSString stringWithContentsOfFile:path encoding:
4    :NSUTF8StringEncoding error:nil];

```

```
3 ESTLocation *location = [ESTLocationBuilder parseFromJSON:content];
```

Listing 5.2: Laden der Location-JSON mit anschließendem Parsen und Instanzieren eines `ESTLocation`-Objektes.

Hierbei wird über den Ressourcen-Pfad der Inhalt der Datei geladen und als `NSString` zwischengespeichert. Anschließend wird der Content an die Methode `parseFromJSON` übergeben, geparsed und daraus ein Objekt der Klasse `ESTLocation` erstellt.

Estimote stellt ebenfalls eine graphische Komponente zur Verfügung (`ESTIndoorLocationView`), um den zuvor angelegten Raum sowie die aktuelle Position darin darstellen zu können. Die Methode `drawLocation` nimmt als Parameter eine `ESTLocation` entgegen und zeichnet diese auf der GUI⁸.

Abschließend kann das Tracking mit der in Listing 5.3 geschilderten Befehlszeile gestartet und über das zuvor beschriebene Delegate verarbeitet werden:

```
1 [self.manager startIndoorLocation:self.location];
```

Listing 5.3: Bei Aufruf der Methode `startIndoorLocation` startet das Tracking und Positionsupdates erfolgen für die übergebene Lokation.

Eine Zusammenfassung der zuvor gezeigten Codefragmente für den Einstieg und zum Umgang mit dem SDK werden in Anhang 5 Listing B.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass neben der Einrichtung des Raumes fünf Schritte genügen, um erste Positionsupdates zu erhalten.

5.2 Testszenarios

Folgender Abschnitt beschreibt den Versuchsaufbau zweier Testräume zur Evaluation des SDKs. Die Räume unterscheiden sich sowohl in ihrer Größe als auch in ihrem Mobiliar. Als Testhardware kommen *Estimote*-Beacons und ein iPod touch der 5-ten Generation mit iOS 8 zum Einsatz. Die Genauigkeit einer Positionsschätzung wird als 'Fehler' bezeichnet und in Metern (m) gemessen. Er beschreibt die euklidische Distanz zwischen realer und geschätzter Position.

5.2.1 Aufenthaltsraum der VIISON GmbH

Abbildung 5.3 zeigt den Aufenthaltsraum der Firma *VIISON*. Hierbei handelt es sich um einen annähernd quadratischen Raum mit den Maßen 8,2 m x 8,3 m, was ca. 68 m² entspricht. Zwei der vier Wände sind mit großen Fensterfronten und einer 1,0 m hohen Heizungsfront versehen. Die Ausstattung beläuft sich hauptsächlich auf einen Esstisch, eine Hantelbank, einen Tischfußball und eine Couchgarnitur mit Wohnzimmertisch. Des Weiteren befindet sich ein Pfeiler mit den Maßen 0,5 m x 0,5 m an der Wand Richtung Süden auf der rechten Seite (vgl. Abbildung 5.4). Somit erfüllen die Eigenschaften des Raumes die Voraussetzungen des vorab beschriebenen Development Kits.

⁸Graphical User Interface



Abbildung 5.3: Aufenthaltsraum der Firma VIISON in Darmstadt.

Quelle: <http://blog.viison.com/post/104765230107/our-new-office>, besucht am: 15.03.15

Versuchsaufbau

Wie in Abbildung 5.4 zu sehen, werden für die Durchführung nach den Vorgaben *Estimates* vier *iBeacons* in der Mitte jeder Wand auf Brusthöhe platziert. Zusätzlich werden vier Messpunkte im Raum definiert, die sich an den folgenden Positionen befinden.

- M1 (0 | 0)
- M2 (-2,98 | 3,03)
- M3 (-2,37 | -2,94)
- M4 (2,9 | 0)

Die Blickrichtung an den Punkten M2 bis M4 ist stets in Richtung Raummitte (Nullpunkt). Messpunkt M1 stellt hingegen eine Ausnahme dar, indem an diesem Punkt vier Messungen in Richtung aller Wände bzw. Beacons durchgeführt wird, um die Abhängigkeit der Ausrichtung beobachten zu können. Hierdurch ergeben sich sieben unterschiedliche Messungen, die jeweils 10 Sekunden (ca. 50 Positionsupdates) durchgeführt werden.

Des Weiteren wird an M4 eine Messung durchgeführt, um zu prüfen, ob und wie stark ein plötzlich auftretender Verlust des Sichtkontakts (NLOS) Einfluss auf die Positionierung hat - die Ausrichtung bleibt hierbei unverändert. Als Hindernis dient der Benutzer selbst, indem er sich nach 10 Sekunden der laufenden Messung zwischen iPod und iBeacon stellt. Hierdurch wird im Wechsel eine LOS- bzw. NLOS-Situation zu Beacon B3 hergestellt.

Neben den Positionierungen bleibt zu prüfen, ob sich das SDK, wie in *Estimates* Werbevideo [est14a] zu sehen, für den Einsatz in einem Navigationsszenario eignet. Diesbezüglich

werden sieben weitere Positionen definiert, die in Kombination einen Navigationspfad bilden (vgl. Abbildung 5.4). Startpunkt ist N1 mit Blickrichtung B2 an dem 10 Sekunden gewartet wird. Anschließend wird in einem normalen Schrittempo die weiteren Pfadpunkte N2 bis N7 abgelaufen. Bei N7 angekommen wird abermals 10 Sekunden gewartet und anschließend den Pfad in umgekehrter Reihenfolge abgelaufen. Das Warten an N7 simuliert das Einlagern oder Herausnehmen von Ware in einem Warenlager.

Die Sendeleistung der Beacons ist bei allen Versuchen auf +4 dBm eingestellt und das Advertising-Paket wird mit einer Frequenz von 5 Hz (Intervall von 200 ms) ausgesendet.

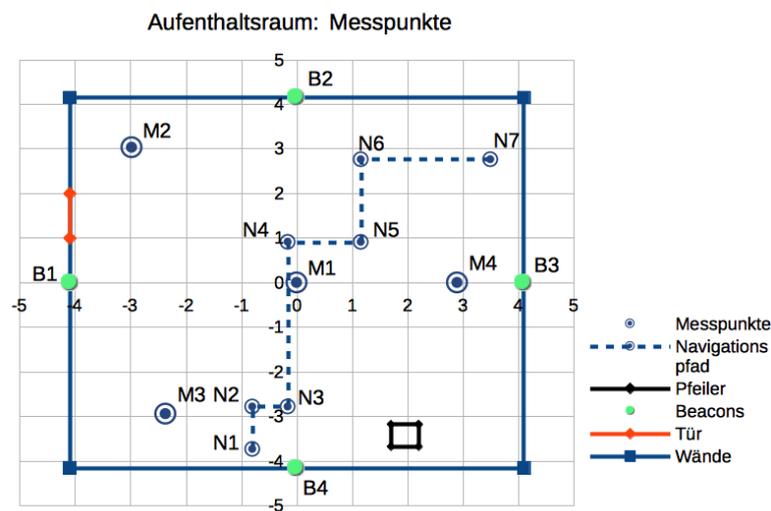


Abbildung 5.4: Darstellung des Aufenthaltsraumes sowie Positionierung der Beacons (B1 - B4), Messpunkte (M1 - M4) und Navigationspfad (N1 - N7) im kartesischen Koordinatensystem.

Ergebnisse

Die Messergebnisse aus Tabelle 5.1 zeigen, dass der durchschnittliche Fehler am Messpunkt M1 von 1,71 m bis 2,97 m reicht. Der Fehler der gemittelten Positionsschätzungen hingegen reichen von 1,32 m bis 2,96 m. An den Koordinaten ist zu erkennen, dass diese stark von der Orientierung des Benutzers abhängen. Die durchschnittliche Positionsschätzung befindet sich stets zwischen dem realen Standpunkt und dem Beacon, in dessen Richtung das Gerät ausgerichtet ist.

Auffällig an M1-B1 ist die große Differenz zwischen der besten Schätzung und der mittleren Schätzung von 1,83 m. Die drei übrigen Ausrichtungen an M1 weisen deutlich geringere Abweichungen auf.

Der Fehler der durchschnittlichen Schätzung ist an allen Randpositionen (M2, M3 und M4) höher als an den vier Messungen an M1, wobei der Fehler der durchschnittlichen Positionsbestimmung an der Position M4 mit 3,35 m am nächsten an die Ergebnisse von M1 heranreicht. Die Resultate an den Positionen M2 (4,67 m) und M3 (6,50 m) sind ungleich größer. Auch hier ist an einer Position, nämlich M4, die Differenz zwischen der besten und der durchschnittlichen Schätzung mit 2,82 m sehr hoch. Die zwei übrigen Positionen weisen Differenzen von 0,78 m an M2 und 0,55 m an M3 auf.

Die jeweils besten Schätzungen (Spalte 2) befinden sich stets unter den ersten 15 Positionsupdates, d.h. innerhalb der ersten 3 Sekunden. Allerdings zählen diese überwiegend zu den Ausreißern und können den durchschnittlichen Fehler lediglich geringfügig beeinflussen.

Position	Ausrichtung	Beste Schätzung - Fehler	Schätzung i. D. - Fehler	Fehler i. D.
M1	B1	(0,03 0,20) - 0,21 m	(-1,98 0,48) - 2,04 m	2,07 m
M1	B2	(0,26 1,97) - 1,99 m	(0,30 2,05) - 2,07 m	2,07 m
M1	B3	(1,49 0,85) - 1,72 m	(2,73 1,15) - 2,96 m	2,97 m
M1	B4	(0,59 0,04) - 0,60 m	(-0,50 -1,22) - 1,32 m	1,71 m
M2	M1	(0,87 2,45) - 3,89 m	(1,49 1,69) - 4,67 m	4,69 m
M3	M1	(2,14 0,93) - 5,95 m	(0,79 2,75) - 6,50 m	6,53 m
M4	M1	(2,66 0,49) - 0,50 m	(0,39 1,15) - 2,76 m	2,89 m

Tabelle 5.1: Messergebnisse an den Messpunkten M1 - M4. Die Abkürzung i. D. bedeutet 'im Durchschnitt' und meint an dieser Stelle den arithmetischen Mittelwert.

Die Ergebnisse des an der Position M4 durchgeführten Tests zur Simulation des Sichtkontaktverlustes können in Tabelle 5.2 eingesehen werden. Bei Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger beläuft sich die Genauigkeit der Schätzung auf 0,69 m und 0,95 m. Bei Verlust des Sichtkontaktes hingegen ergibt sich bei den ersten beiden Messungen eine Genauigkeit von 3,26 m und 3,35 m. Die letzte NLOS-Messung bildet mit 1,93 m eine Ausnahme. Eine graphische Darstellung der einzelnen Positionierungen ist in Abbildung B.3 einzusehen. Sie verdeutlicht die in der Tabelle sichtbar gewordene Beeinflussung durch den Verlust des

Sichtkontaktes. Die Testreihe im Aufenthaltsraum wird von der angesprochenen Navigation

Position	Ausrichtung	Situation	Schätzung i. D. - Fehler
M4	M1	LOS	(3,00 0,69) - 0,69 m
M4	M1	NLOS	(0,48 2,19) - 3,26 m
M4	M1	LOS	(2,56 0,60) - 0,69 m
M4	M1	NLOS	(-0,31 0,95) - 3,35 m
M4	M1	LOS	(2,07 0,46) - 0,95 m
M4	M1	NLOS	(0,99 0,29) - 1,93 m
LOS i. D. - Fehler			(2,54 0,58) - 0,68 m
NLOS i. D. - Fehler			(0,39 1,15) - 2,76 m

Tabelle 5.2: Messergebnisse der LOS- bzw. NLOS-Situationen am Messpunkt M4 im Aufenthaltsraum.

abgeschlossen. In Abbildung 5.5 ist zu sehen, dass die erste Schätzung beim Start der Navigation nahe dem Nullpunkt liegt. Anschließend bewegen sich die Positionierungen sehr schnell Richtung B2. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass sich der Benutzer in Wirklichkeit noch nicht bewegt hat (vgl. Abschnitt 5.2.1). Nach Ablauf der 10 Sekunden und dem Loslaufen erhöht sich zunehmend die x -Koordinate bis die geschätzte Position in der rechten oberen Ecke ist. Nach Ankunft an N7 und während der 10 Sekunden Stillstand, wandert die Position sehr langsam in Richtung B3. Sobald sich der Benutzer um 180° im Uhrzeigersinn dreht und beginnt den Pfad in umgekehrter Reihenfolge abzulaufen, beginnen die Positionsschätzungen innerhalb von ca. 2 Sekunden (10 Positionsupdates) bis zu einem halben Meter vor das Beacon B1 zu verlaufen. Erst nach dem Passieren von N4 auf dem Weg zu N3 verändert sich die geschätzte Position und bewegt sich Richtung N1. An N1 angekommen erfährt die Position einen kurzen Peak auf der x -Achse in negativer Richtung und nähert sich anschließend N1 an.

5.2.2 Küche

In diesem Raum liefert die App zur Einrichtung des Raumes, die eingangs erwähnt wurde, bereits akzeptable Ergebnisse. Aus diesem Grund wird die JSON-Struktur exportiert, geringfügig angepasst und anschließend im Prototypen verwendet, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wird. Die Raummaße der Küche betragen $3,6\text{ m} \times 3,2\text{ m}$ ($11,52\text{ m}^2$). Die Einrichtung ist mit einer Einbauküche und einem Esstisch typisch für eine Wohnküche.

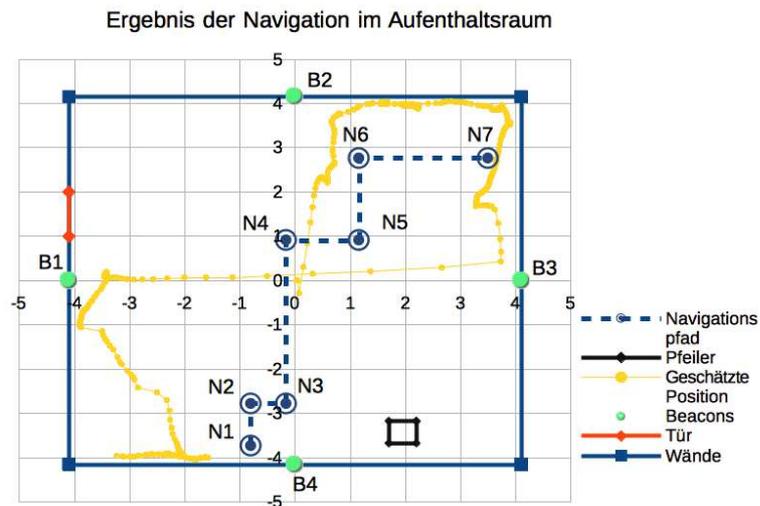


Abbildung 5.5: Ergebnis der Navigation im Aufenthaltsraum. Erste Schätzung bei Beginn der Navigation an N1 ist Nahe dem Nullpunkt.

Versuchsaufbau

Abbildung 5.6 zeigt die Positionierungen der *iBeacons*, die, mit Ausnahme von Beacon B1, in der Mitte jeder Wand auf Brusthöhe angebracht sind. Grund für die Ausnahme ist, dass seitens *Estimote* die Positionierung des ersten Beacons rechts neben der Tür empfohlen wird, wodurch die Position des selbigen festgestellt und in den Plan eingezeichnet werden kann. Die Messpunkte M1 bis M4 befinden sich an folgenden Positionen:

- M1 (0 | 0)
- M2 (1,85 | 0,79)
- M3 (-1,83 | -0,71)
- M4 (0,17 | 1,70)

Der Versuchsaufbau orientiert sich an dem des Aufenthaltsraumes. Dabei ist die Blickrichtung an den Messpunkten M2 bis M4 zum Nullpunkt gerichtet. M1 bildet abermals eine Ausnahme, dadurch dass an dieser Position vier Messungen in Ausrichtung der vier Beacons stattfindet. Die Dauer der Messungen ist auf 10 Sekunden begrenzt.

Zudem wird an Position M4 der Verlust des Sichtkontakts simuliert, indem sich der Benutzer im Wechsel alle 10 Sekunden zwischen Beacon B1 und iPod stellt.

Um auch in diesem Szenario die Funktionalität des SDKs im Einsatz einer Navigation zu prüfen, werden vier Punkte N1 - N4 für den Navigationspfad definiert. Startpunkt ist N1 an dem zu Beginn 10 Sekunden mit Ausrichtung gegen M1 (Nullpunkt) gewartet wird.

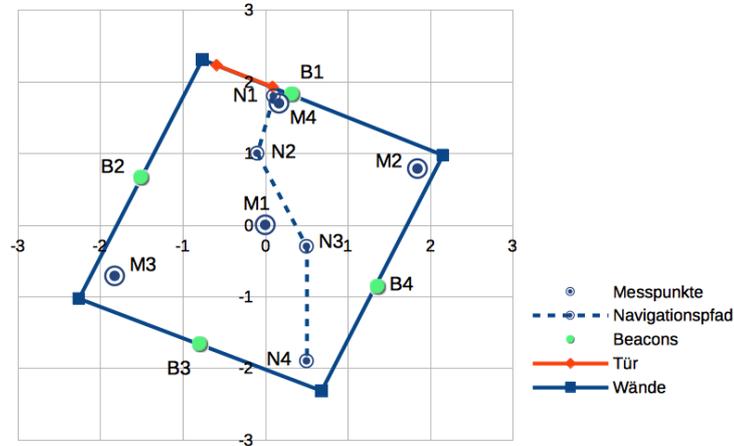


Abbildung 5.6: Darstellung der Küche sowie Positionierung der Beacons (B1 - B4), Messpunkte (M1 - M4) und Navigationspfad (N1 - N4) im kartesischen Koordinatensystem.

Anschließend folgt eine Bewegung über N2 und N3 zu N4. Hier angekommen wird erneut eine Pause von 10 Sekunden eingelegt. Der Rückweg findet im Anschluss einer 180° Drehung im Uhrzeigersinn über die bereits genannten Wegpunkte statt.

Die Sendeleistung und das Advertising-Intervall bleiben unverändert auf +4 dBm und 200 ms eingestellt.

Ergebnisse

Tabelle 5.3 zeigt die Messergebnisse im Szenario 'Küche' auf. Die durchschnittliche Genauigkeit am Messpunkt M1 liegt zwischen 0,68 m und 1,13 m. Zudem ist zu beobachten, dass die Genauigkeiten der gegenüberliegenden Ausrichtungen mit 0,68 m und 0,76 m sowie 1,04 m und 1,13 m annähernd identisch sind. Die Koordinaten der mittleren Schätzungen zeigen abermals eine Orientierung hinsichtlich der zugewandten Beacons. In Abbildung B.2 wird dies anhand einer Gegenüberstellung der Messergebnisse im Koordinatensystem verdeutlicht.

Des Weiteren ist der Fehler an den Randpositionen M2, M3 und M4 mit 2,47 m, 2,39 m und 1,31 m deutlich größer als an allen vier Ausrichtungen an M1. Die höchste Genauigkeit an diesen drei Messpunkten kann damit an M4 mit 1,31 m ausgemacht werden.

Die Schätzungen mit der höchsten Genauigkeit sind an M1-B1, M1-B2, M1-B3 und M4 auszumachen, wobei die beste Positionsschätzung an Punkt M1-B4 ist mit einer Differenz von 0,06 m eine minimal niedrigere Genauigkeit aufweist.

Weiterhin werden die Ergebnisse des Sichtkontaktverlust-Tests durch Tabelle 5.4 darge-

Position	Ausrichtung	Beste Schätzung - Fehler	Schätzung i.D. - Fehler	Fehler i.D.
M1	B1	(-0,02 0,01) - 0,02 m	(0,44 0,95) - 1,04 m	1,08 m
M1	B2	(-0,51, 0,09) - 0,52 m	(-0,66 0,15) - 0,68 m	0,74 m
M1	B3	(-0,13 -0,46) - 0,48 m	(-0,27 -1,09) - 1,13 m	1,13 m
M1	B4	(0,63 0,07) - 0,64 m	(0,73 -0,22) - 0,76 m	0,76 m
M2	M1	(0,50 1,09) - 1,38 m	(-0,62 1,02) - 2,47 m	2,51 m
M3	M1	(-0,38 0,26) - 1,73 m	(0,35 0,29) - 2,39 m	2,41 m
M4	M1	(0,07 1,13) - 0,58 m	(-0,11 0,42) - 1,31 m	1,44 m

Tabelle 5.3: Messergebnisse an den Messpunkten M1 - M4.

stellt. Die Fehler der NLOS-Situationen belaufen sich auf 0,71 m und 2,04 m. Bei Sichtkontakt ist der Fehler der mittleren Schätzungen mit 0,20 m und 0,48 m deutlich geringer. Eine graphische Darstellung der Schwankungen kann im Anhang in Abbildung B.5 eingesehen werden. Bei Betrachtung ist zu erkennen, dass die gelieferten Positionsupdates der SDKs sich nicht sprunghaft ändern, sondern sich schrittweise den neuen Umständen anpassen.

Position	Ausrichtung	Situation	Schätzung i.D. - Fehler
M4	M1	NLOS	(0,58 1,12) - 0,71 m
M4	M1	LOS	(-0,02 1,63) - 0,20 m
M4	M1	NLOS	(-0,54 -0,22) - 2,04 m
M4	M1	LOS	(-0,13 1,31) - 0,48 m
NLOS i.D. - Fehler			(0,02 0,45) - 1,26 m
LOS i.D. - Fehler			(-0,05 1,47) - 0,31 m

Tabelle 5.4: Messergebnisse der LOS- bzw. NLOS-Situationen am Messpunkt M4.

Abschließend wird das Resultat der Navigation durch die Küche in Abbildung 5.7 darge-

stellt. Zu Beginn der Navigation, beim Stillstehen an Position N1, wird die Position in der Nähe des realen Standorts angezeigt. Anschließend verläuft die geschätzte Position Richtung Raummitte und wieder zurück gegen N1, ohne dass eine Bewegung stattgefunden hat. Nach Ablauf der 10 Sekunden erkennt die Software, dass der Benutzer seine Position verändert und liefert beim Gang zu N4 gute Ergebnisse. Kurz vor Ankunft an N4 wandert die geschätzte Position etwas Richtung Nullpunkt und verändert sich während des 10 sekündigen Stehens mit Blickrichtung zur Wand geringfügig in Richtung B3. Bei der Drehung um 180° im Uhrzeigersinn und dem darauffolgenden Zurücklaufen von N4 zu N1, verläuft die Positionsschätzung im Bogen über B2 zu B1. Bei Ankunft an N1 mit Blickrichtung zu B1 liefert die Software ähnlich der Startsituation gute Ergebnisse.

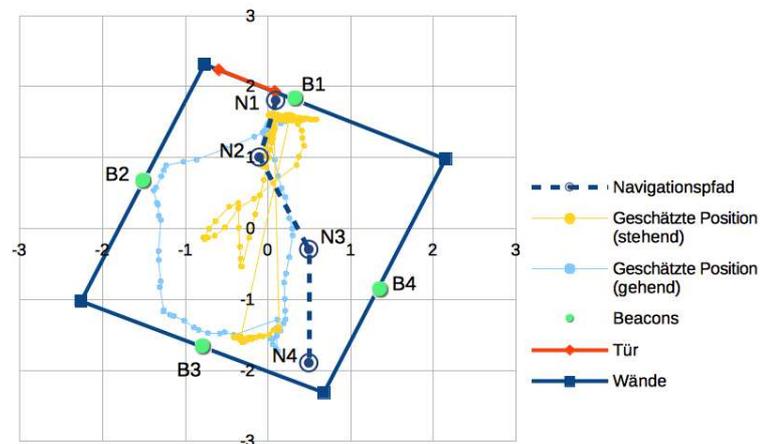


Abbildung 5.7: Ergebnis der Navigation in der Küche.

5.3 Zwischenfazit Estimote Indoor Location

Abschnitt 5.1.1 hat gezeigt, dass das Ziel *Estimates*, mithilfe des SDKs in wenigen und einfachen Schritten Software zu entwickeln, gut umgesetzt wird. Nach der Platzierung der *iBeacons* und dem Ausmessen des Raumes genügen vorerst fünf Programmierschritte, um Positionsupdates zu erhalten. Hierbei sind keinerlei Kenntnisse über die dahinterliegende Mathematik zur (Tri-)Lateration notwendig.

Die angesprochene Einrichtung und Vermessung des Raumes sowie der Positionierungen der Beacons ist über die mitgelieferte App nur schwer umzusetzen. Häufig kommt es zu Fehlern während der Durchführung oder die gelieferten Ergebnisse entsprechen nicht den realen Maßen. Vor allem im Testszenario des Aufenthaltsraumes ist eine Vermessung auf Grundlage der App nicht möglich, weshalb dieser Raum händisch vermessen wird. Im Umfeld des zweiten Raumes (Küche) gelingt zwar die Einrichtung mittels App, allerdings müssen nachträglich Korrekturen der Raummaße vorgenommen werden. Auf Grundlage der Größen-

unterschiede der zwei getesteten Räume entsteht hieraus abgeleitet der Eindruck, dass die App zur Einrichtung bei kleinen Räumen zwar keine exakten Ergebnisse liefert, jedoch der Einsatz für Teilaufgaben möglich ist. In größeren Umgebungen hingegen leistet diese keinen Mehrwert.

Bei Betrachtung der Testergebnisse am Messpunkt M1 beider Testumgebungen fällt auf, dass die geschätzte Positionierung stark von der Ausrichtung des Benutzers abhängt. Abbildungen B.2 und B.4 stellen diesen Effekt graphisch dar. Ursache hierfür ist der Verlust des Sichtkontaktes zu demjenigen Beacon, das hinter dem Benutzer liegt. Der Benutzer dämpft demnach das Signal, wodurch es zum Pfadverlust kommt. Hierdurch wird ein geringerer RSSI-Wert gemessen, als es bei freier Sicht der Fall wäre. Dies entspricht im Verlustsmodell einem größeren Abstand. Wie das von *Estimote* verwendete Modell im Detail aussieht, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden.

Überdies wird deutlich, dass der Fehler der Schätzungen an den Randpositionen deutlich größer ist als in der Raummitte. Bei der Berechnung des durchschnittlichen Fehlers an den Randpositionen (4,70 m) und der Mitte (3,24 m) im Aufenthaltsraum, kann eine Differenz von 1,46 m ausgemacht werden (vgl. Tabelle 5.1). Gleiche Phänomene lassen sich im zweiten Testraum (Küche) beobachten. Hier ist der mittlere Fehler in der Mitte mit 0,93 m um 1,19 m geringer als an den Randpositionen (2,12 m). Auffällig ist jedoch, dass die Differenz im Aufenthaltsraum etwas größer ist, als die in der Küche. Allerdings lässt sich dieser Unterschied nicht nur in diesem speziellen Fall, sondern generell feststellen. Werden die gemessenen Werte nicht Szenario-intern sondern untereinander verglichen, fällt auf, dass die des Aufenthaltsraumes sichtbar niedrigere Genauigkeiten aufweisen. Teilweise werden sogar die Randpositionen der Küche besser geschätzt als M1 (Raummittelpunkt) des Aufenthaltsraumes.

Weiterhin bildet Messpunkt M4 in beiden Szenarien eine Ausnahme. Dieser Messpunkt zählt zwar zu den Randpositionen, jedoch ist hier der Fehler im Durchschnitt geringer, als an den übrigen Randpositionen M2 und M3. Im Aufenthaltsraum ist der an M4 gemessene durchschnittliche Fehler sogar um 0,08 m kleiner als der an M1-B1. Da diese Beobachtung in zwei unabhängigen Testszenarien gemacht werden kann, ist davon auszugehen, dass dies mit der geringen Entfernung zum jeweiligen Beacon zusammenhängt - B3 im Aufenthaltsraum, B1 in der Küche. Hieran ist zu erkennen, dass das SDK zusätzlich das Näheprinzip (Proximity) der *iBeacon*-Technologie zur Positionsbestimmung einsetzt, was sich mit dem zuvor genannten Ziel des SDKs deckt: Einfacher Umgang und volle Kontrolle über Proximity und Position.

Die Ergebnisse der Sichtkontaktverlust-Tests verdeutlichen noch einmal den bereits durch die Messungen an Messpunkt M1 bekannt gewordenen Effekt der Positionsbeeinflussung durch Hindernisse im Raum. Sie zeigen deutlich, dass die geschätzte Position starke Abweichungen erfährt, sobald der Sichtkontakt zum Beacon unterbrochen wird. Die Unterschiede zwischen den Fehlern der beiden Situationen LOS (0,31 m) und NLOS (1,26 m) betragen in der Küche 0,95 m. Im Aufenthaltsraum ist die Differenz des Fehlers von LOS (0,68 m) und NLOS (2,76 m) mit 2,08 m zunehmend ausgeprägter.

Navigationen sind unter dem Einsatz des SDKs nur begrenzt möglich. Neben wenigen passablen Positionsergebnissen, ist das Navigationsszenario in beiden Testumgebungen mit großen Fehlmessungen und Ausreißern versehen. Besonders beim Wenden am jeweils letzten Wegpunkt, N7 im Aufenthaltsraum und N4 in der Küche, verlaufen die Positionsschätzungen sprunghaft. Dies wird vermutlich dadurch hervorgerufen, dass der Wechsel zwischen LOS und NLOS innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne gleich zwischen zwei Beacons stattfindet. Hierdurch wird beispielsweise die Position an der gegenüberliegenden Wand geschätzt.

Zusammengefasst bietet das SDK einen komfortablen Umgang, allerdings wird die von *Estimote* angegebene Genauigkeit von 0,5 m bis 1,0 m lediglich unter optimalen Bedingungen erreicht. Hierzu zählen neben dem bestehenden Sichtkontakt auch der Abstand zu den *iBeacons*. In LOS-Situationen in unmittelbarer Nähe zu einem Beacon wird die angegebene Genauigkeit eingehalten. Außerdem werden im Raummittelpunkt kleiner Räume (vgl. Küche) gute Ergebnisse erreicht, da der Abstand zu den Beacons nicht zu groß ist. Allgemein ist die Positionierung in kleinen Räumen deutlich besser, das heißt von höherer Genauigkeit. An Randpositionen in größeren Umgebungen hingegen beträgt der Fehler bis zu 6,53 m. In Navigationsszenarien wird die beworbene Genauigkeit in keiner Weise erreicht. Die Zuverlässigkeit der geschätzten Position ist weit unter der des genannten Werbevideos. Ein weiteres, sehr großes Problem bei der Umsetzung unter Anwendung des SDKs ist die Abhängigkeit der Weiterentwicklung. Aktuell befindet es sich in einem sehr frühen Entwicklungsstand, der lediglich die Umsetzung eines einzigen Raumes erlaubt. Dieser muss eine rechteckige Grundfläche aufweist. Ferner bleibt abzuwarten, welche Genauigkeiten mit zukünftigen Versionen erreicht und welche Funktionen *Estimote* in Zukunft zur Verfügung stellen wird. Weiterhin ist es fraglich, ob das SDK bei zunehmender Reife nicht einem Lizenzmodell wie SaaS⁹ unterstellt wird. Fehlende Open Source Lizenzen, die eine Weiterentwicklung unter eigener Regie erlauben, fehlen ebenfalls. Die Software wird stattdessen als Black Box zur Verfügung gestellt, wodurch zusätzlich die Fehlerfindung bei schlechten Positionsupdates nahezu unmöglich wird.

Angesichts dieser Gründe, ist das Indoor Location SDK von *Estimote* zum Einsatz in einem realen Szenario zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht geeignet. Das folgende Kapitel beschäftigt sich detailliert mit der Signalausbreitung der *iBeacon*-Technologie und versucht Charakteristiken herauszustellen, die zur Implementierung einer Indoor-Positionierung von Bedeutung sind.

⁹Software as a Service

Kapitel 6

Signaluntersuchungen

Die Untersuchung des *Estimote* Indoor Location SDKs hat gezeigt, dass die Güte der gelieferten Positionierungen stark von äußeren Umständen, wie Nähe zu den Beacons und Sichtkontakt, abhängt. Feineinstellungen innerhalb des SDKs sind auf Grund der Art und Weise wie dieses zur Verfügung gestellt wird, nämlich als Closed Source¹, nicht möglich. Infolgedessen werden in diesem Kapitel die Signalausbreitung und empfangene Signalstärke der *iBeacon*-Technologie weiter analysiert, um darauf aufbauend eine Indoor-Positionierung umzusetzen. Die Analyse findet anhand der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hilfs-App für iOS statt. Diese wird, wie bereits bei der Evaluation des Indoor Location SDKs, auf einem iPod touch der 5-ten Generation mit iOS 8 ausgeführt, der somit als Empfänger fungiert.

6.1 Core Location Framework und Estimote SDK

In diesem Abschnitt folgt eine Untersuchung der empfangenen Signalstärke in einem Abstand von einem Meter bei ruhendem Empfänger. Die Tragehöhe des Empfängers (iPod touch) beträgt 0,90 m, der Sender (Beacon) ist auf 1,40 m an der Wand angebracht. Abbildung 6.1 stellt diesen Aufbau graphisch dar. Da die Positionsschätzung auf der empfangenen

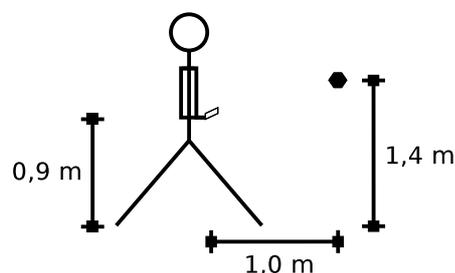


Abbildung 6.1: Darstellung des Versuchsaufbaus

¹Proprietäre Software. Der Quelltext ist nicht öffentlich einzusehen.

Signalstärke aufbauen soll, ist es wünschenswert, dass in solch einem Szenario stets der gleiche RSSI-Wert gemessen wird, da sich der Abstand zwischen Beacon und iPod nicht ändert. Der aktuelle Forschungsstand und das Grundlagenkapitel haben jedoch bereits gezeigt, dass in der Praxis, beruhend auf Mehrwegeempfang und Messungenauigkeiten, ein anderes Verhalten vorherrscht. Aus diesem Grund liefern folgende Versuche ein genaues Bild über den Verlauf und die Streuung der Signalstärke. Hierzu wird zunächst das Standardframework Core Location herangezogen.

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, stellt *Estimote* neben dem Indoor Location SDK ein weiteres SDK bereit. Das Estimote SDK erweitert die Funktionalität des Core Location Frameworks von *Apple* um spezielle Methoden zur ausschließlichen Programmierung mit *Estimote* Beacons. Für die Umsetzung dieser Erweiterungen kommt das Core Bluetooth Framework zum Einsatz. Somit existiert eine zweite Möglichkeit RSSI-Werte zu messen, die in Abschnitt 6.1.2 untersucht wird. Zur Analyse der RSSI-Werte werden jeweils drei Sendeleistungen gewählt:

- +4 dBm
- -8 dBm
- -12 dBm

Die maximal mögliche Sendeleistung von +4 dBm verspricht die höchste Reichweite. Sie ist daher von großer Bedeutung und bedarf einer Analyse. Als weitere Abstufungen werden ca. $\frac{3}{4}$ und $\frac{2}{3}$ der maximalen Sendeleistung gewählt. Das Advertising-Intervall wird hingegen bei allen Messungen auf 200 ms eingestellt. Pro Sendeleistung werden acht Messungen mit je 200 Messwerten durchgeführt, wodurch es jeweils zu einem Gesamtstichprobenumfang von 1600 RSSI-Werten kommt. Die Messdauer für 200 Werte beläuft sich bei der Updatefrequenz des Core Location Frameworks von 1 Hz auf 3:20 Minuten. Das Estimote SDK benötigt für die gleiche Anzahl 40 Sekunden. Das untersuchte Merkmal RSSI kann diskrete Werte von 0 bis -100 annehmen.

6.1.1 Core Location Framework

Zur besseren Übersicht werden die ermittelten Messwerte pro Signalstärke in einem Box-Whisker-Plot dargestellt (vgl. Abbildung 6.2). Anhand dessen lässt sich ein schneller Überblick über den Verlauf der Messwerte erhalten. Dabei wird die sogenannte Box durch das 1. und 3. Quartil gebildet und gibt an, in welchem Bereich 50 % der mittleren Messwerte liegen. Die Boxbreite wird infolgedessen Interquartilsabstand (IQR²) genannt. Die durchgezogene horizontale Linie innerhalb der Box beschreibt den Median (2. Quartil). Die Whisker oder auch Antennen beschreiben, in welchem Bereich die restlichen 50 % der Messwerte verteilt sind.

Die erste Spalte der Abbildung zeigt, dass bei einer Sendeleistung von +4 dBm 50 % der Messwerte zwischen -54 dBm und -58 dBm liegen (Box). Der Median befindet sich bei

²Interquartile Range

-56 dBm und liegt damit genau in der Mitte der Box. Die Whisker haben jeweils eine Länge von 5 dBm. Anhand der Symmetrie ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte bei dieser Signalstärke sehr gleichmäßig verteilt sind. Auffällig sind ebenfalls die Anzahl der milden Ausreißer (Kreise) und extremen Ausreißer (Rauten). Der größte Wert ist 0 dBm, der niedrigste gemessene RSSI-Wert ist -82 dBm.

Bei Betrachtung des Box-Whisker-Plots der bei -8 dBm gemessenen Werte wird zunächst deutlich, dass die RSSI-Werte deutlich geringer sind. Der Median liegt bei -69 dBm, das 1. Quartil mit -71 dBm und das 3. Quartil mit -67 dBm jeweils 2 dBm von diesem entfernt. Bei zusätzlicher in Betrachtung der Whisker wird sichtbar, dass der Datenbereich eine identische Breite im Vergleich zur Testreihe mit +4 dBm besitzt. Geringe Unterschiede lassen sich lediglich hinsichtlich der Ausreißer feststellen. Der Box-Whisker-Plot der Testreihe mit einer Signalstärke von -8 dBm weist etwas weniger extreme Ausreißer jenseits des rechten Whiskers auf, stattdessen befinden sich mehr milde Ausreißer auf der Seite des linken Whiskers. Die letzte Spalte der Grafik beschreibt die Messwerte unter dem Einsatz einer Sendeleistung von -12 dBm. Hier ist auffällig, dass der Interquartilsabstand deutlich größer ist als bei den vorangegangenen Szenarien. Das 1. Quartil befindet sich bei -74 dBm, das 3. Quartil bei -68 dBm. Aber auch die Länge der Whisker hat auf beiden Seiten einen Zuwachs erfahren. Somit hat insgesamt die Streuung um den Median (-71 dBm) nicht nur innerhalb sondern auch außerhalb der Box zugenommen. Die Anzahl der Ausreißer hat im Gegenzug abgenommen. Der einzige extreme Ausreißer befindet sich bei 0 dBm.

Da eine Messung von 0 dBm einer Übertragung der Sendeleistung ohne Verlust gleichzusetzen ist, kann dieser Wert besonders bei einer Entfernung von 1 m als unmöglich angenommen werden. Das Grundlagenkapitel (vgl. 3.3) hat gezeigt, dass selbst bei Sichtkontakt eine Freiraumdämpfung stattfindet und hierdurch die übertragene Signalstärke eine Dämpfung erfährt. Vielmehr ist es möglich, dass zwar das Advertising-Paket am Empfänger registriert wird, jedoch kein RSSI-Wert ermittelt werden kann. Statt keinem Wert (NULL), gibt das Framework in solch einem Fall einen RSSI-Wert von 0 dBm zurück. Dieser Umstand wird im Folgenden als Fehlmessung bezeichnet.

Bemerkenswert an diesem extremen Ausreißer ist sein Auftreten bei allen drei Signalstärken. Bei näherer Untersuchung wird deutlich, dass die Häufigkeit des Auftretens mit geringerer Signalstärke abnimmt. Während bei einer Sendeleistung von +4 dBm insgesamt 52 Messungen (3,25 %) mit diesem Wert registriert werden, sind es im Gegenzug bei einer Sendeleistung von -8 dBm 39 (2,48 %) und bei -12 dBm lediglich 3 (0,19 %) von jeweils 1600 Messwerten. Diese vergleichsweise hohe Anzahl von Fehlmessungen bei +4 dBm und -8 dBm wird jeweils von zwei Messungen stark beeinflusst, die in Abbildung 6.3 dargestellt werden. Zu Beginn der zwei Messungen 5 und 7 (Sendeleistung von +4 dBm) werden in Summe 33 Fehlmessungen (17 und 16) von insgesamt 52 registriert, was einem Anteil von 63,46 % entspricht. Die Messungen 3 und 8 unter der Sendeleistung -8 dBm zählen insgesamt 30 Fehlmessungen (18 und 12) von 39 (76,91 %). Abschließend kann gesagt werden, dass es zwar vereinzelt zu Fehlmessungen kommt, hauptsächlich treten diese jedoch nach dem Starten eines Messvorgangs auf.

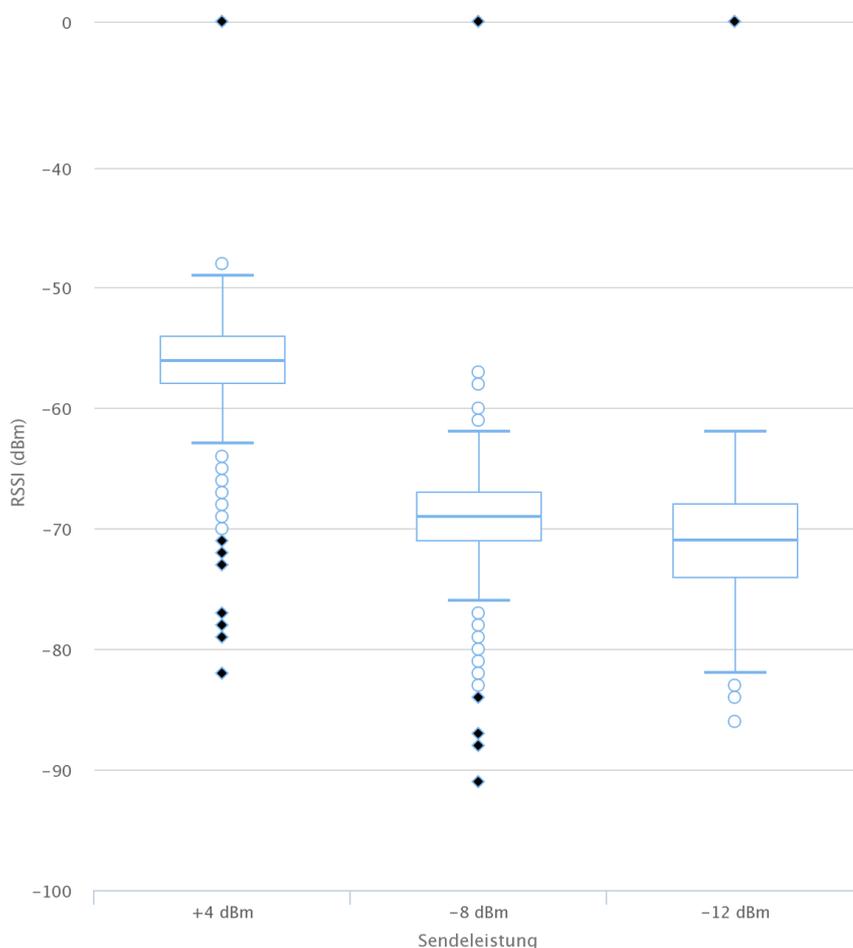


Abbildung 6.2: Darstellung der mithilfe des Core Location Frameworks erhobenen Messergebnisse (1600 Messwerte pro Sendeleistung) in einem Meter Entfernung zum Beacon als Box-Whisker-Plots. Kreise entsprechen milden, Rauten mit dunkler Füllung extremen Ausreißern.

6.1.2 Estimote SDK

Wie bereits angesprochen ist der Versuchsaufbau für die Analyse des Estimote SDKs identisch zu dem des Core Location Frameworks, um gleiche Testbedingungen zu schaffen. Im Folgenden kommt abermals die Diagrammart Box-Whisker-Plot zur Analyse der Daten zum Einsatz. Wie in Abbildung 6.4 zu sehen, liegt der Median bei einer Sendeleistung von +4 dBm bei -56 dBm. Das 1. Quartil befindetet bei -58 dBm, das 3. Quartil bei -53 dBm, wodurch der Interquartilsabstand eine Breite von 5 dBm besitzt. Hierdurch ergibt sich eine geringe Asymmetrie innerhalb der Box. Dies bedeutet, dass die durch die Box dargestellten Messwerte nicht gleichmäßig um den Median streuen. Die Länge der Whisker dagegen ist

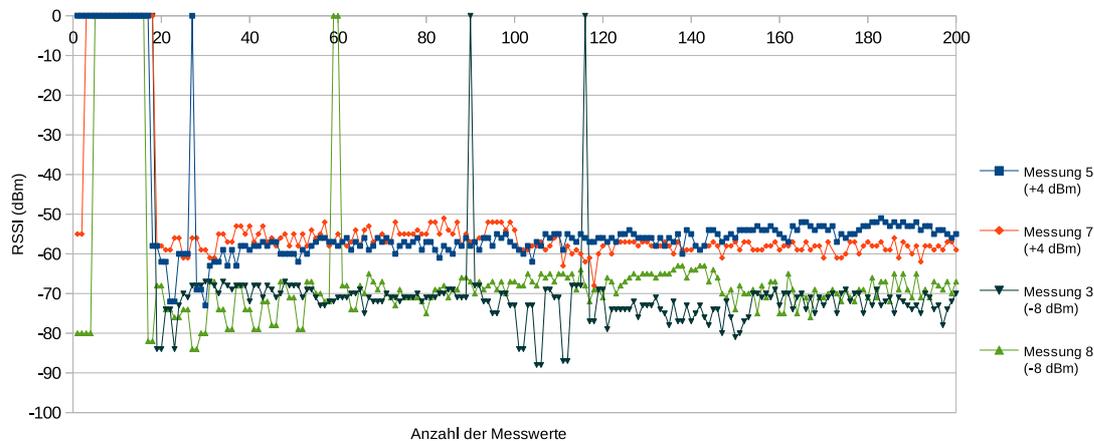


Abbildung 6.3: Fehlmessungen zu Beginn einer Messung unter Verwendung der Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm.

mit 6 dBm auf beiden Seiten identisch. Des Weiteren existiert ein milder Ausreißer bei -67 dBm und ein extremer Ausreißer bei -100 dBm.

Die zweite Spalte der Grafik, welche die Messwerte bei der eingestellten Sendeleistung von -8 dBm repräsentiert, zeigt eine ähnliche leicht asymmetrische Streuung um den Median (-70 dBm). Der Interquartilsabstand ist ebenfalls 5 dBm, die Länge der Whisker hingegen ist mit 5 dBm etwas geringer als bei einer Sendeleistung von +4 dBm. Das bedeutet, dass die mittleren 50 % der RSSI-Werte in gleicher Weise um den Median streuen. Lediglich die restlichen durch die Whisker dargestellten Werte weisen eine geringere Streuung als bei +4 dBm auf. Der einzige gemessene Ausreißer bei dieser Leistung ist extrem und liegt bei -100 dBm. Die bei -12 dBm gemessenen RSSI-Werte weisen mit Abstand die größte Streuung auf. Hier ist der Median mit -71 dBm zwar lediglich 1 dBm geringer als bei der Sendeleistung von -8 dBm, der Interquartilsabstand ist hingegen mit 9 dBm deutlich größer. Weiterhin sind die Daten nicht gleichmäßig verteilt, was sich sowohl in der Box als auch in der unterschiedlichen Länge der Whisker äußert. Der rechte Whisker befindet sich bei -61 dBm und hat damit eine Länge von 6 dBm. Im Gegensatz dazu liegt der linke Whisker bei -88 dBm und weist somit die doppelte Länge (12 dBm) auf. Demzufolge ist die Streuung der Messwerte links des 1. Quartils doppelt so groß wie rechts des 3. Quartils. Dies wird durch die Existenz der Ausreißer im Bereich -89 dBm bis -100 dBm verstärkt.

Beim weiteren Vergleich der Diagramme untereinander fällt auf, dass der Ausreißer bei -100 dBm bei jeder Sendeleistung auftritt. Dieser wird jedoch maximal 5 mal pro Messreihe (1600 RSSI-Werte) registriert und hat damit eine sehr geringe Auftrittswahrscheinlichkeit von 0,31 %. Ähnlich des RSSI-Werts von 0 dBm im Core Location Frameworks kann beim Estimote SDK davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um Fehlmessungen handelt. Eine empfangene Signalstärke -100 dBm ist zwar theoretisch möglich, jedoch wird diese in Situationen gemessen, in denen ein tatsächliches Auftreten des Messwertes unrealistisch ist.

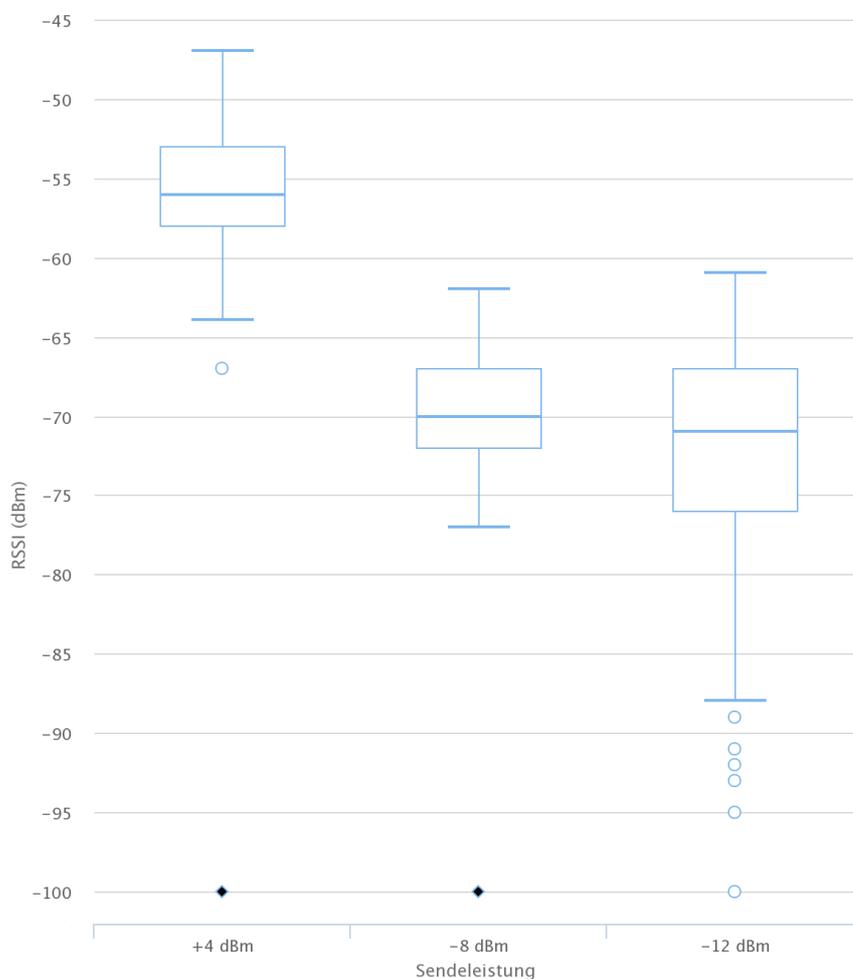


Abbildung 6.4: Darstellung der mithilfe des Estimote SDKs erhobenen Messergebnisse in einem Meter Entfernung zum Beacon als Box-Whisker-Plots. Kreise entsprechen milden, Rauten extremen Ausreißern.

Abbildung 6.5 zeigt die Messreihen, die von Fehlmessungen betroffen sind. Es wird deutlich, dass selbst bei einer Sendeleistung von +4 dBm eine Signalstärke von -100 dBm gemessen wird, was angesichts des restlichen Signalverlaufs und der gegebenen Entfernung von 1 m nur mit einer Fehlmessung gleichzusetzen ist. Darüber hinaus spricht für die Theorie der Fehlmessung, dass bei tatsächlichem Einbruch der gemessenen Signalstärke nicht zwangsläufig in jedem Fall der minimal mögliche Wert gemessen werden muss.

6.1.3 Zwischenfazit Core Location und Estimote SDK

Abschnitt 6.1 hat gezeigt, welche RSSI-Werte bei ruhendem Sender (*iBeacon*) und Empfänger (iPod touch) in einem Abstand von 1 m gemessen werden. Wie bereits zu Beginn des Kapitels

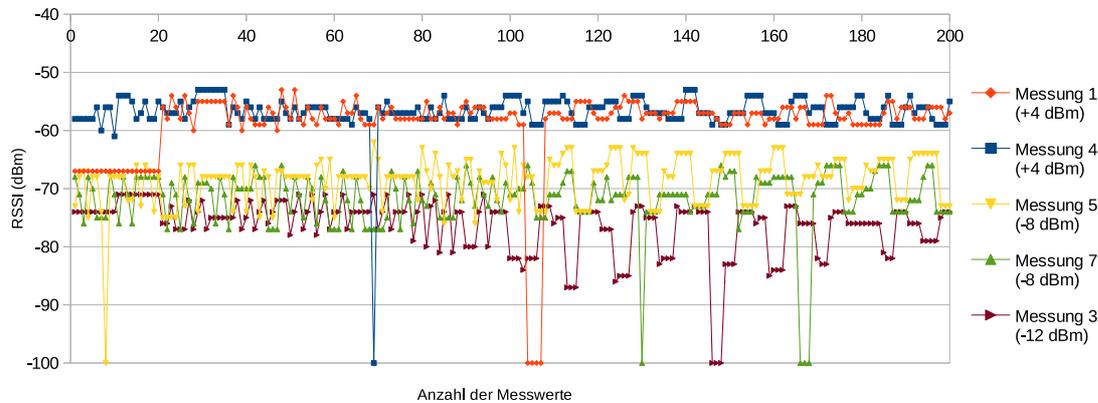


Abbildung 6.5: Darstellung der Messreihen, die mit Fehlmessungen (-100 dBm) behaftet sind.

erwähnt, ist eine geringe Streuung der gemessenen Signalstärken von großer Bedeutung, da hiervon abgeleitet eine Abstandsschätzung erfolgt. Je robuster der Verlauf der RSSI-Werte, desto zuverlässiger kann eine Schätzung erfolgen.

Es hat sich herausgestellt, dass bei Einsatz des Core Location Frameworks die RSSI-Werte gleichmäßig um den Median streuen. Zwar werden bei einer Sendeleistung von -8 dBm deutlich geringere Werte im Vergleich zu +4 dBm gemessen, die Streuung ist jedoch annähernd identisch. Lediglich anhand der Ausreißer lassen sich die beiden Sendeleistungen unterscheiden, die sich bei -8 dBm etwas gleichmäßiger links und rechts des Medians verteilen. Eine sichtbar größere Streuung zeigt der Box-Whisker-Plot der Messreihen unter Zuhilfenahme der Sendeleistung -12 dBm. Sowohl die mittleren 50 % der Messwerte (Box) als auch die Werte außerhalb der Quartile, die durch die Whisker gekennzeichnet werden, beschreiben eine größere Streuung als bei den zuvor beschriebenen Sendeleistungen. Fehlmessungen in Form des zurückgelieferten RSSI-Werts von 0 dBm kommen bei allen Sendeleistungen vor. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten reicht von 3,25 % unter Verwendung der Sendeleistung +4 dBm bis 0,19 % bei einer Sendeleistung von -12 dBm. Sie sinkt somit bei geringeren Sendeleistungen sichtbar. Mehrheitlich treten diese zu Beginn einer Messreihe auf, was bedeuten könnte, dass der Empfänger beim Start Probleme mit der Ermittlung der RSSI-Werte hat.

Die Beobachtungen bei Verwendung des Estimote SDKs sind ähnlich. Der Interquartilsabstand, der die Streubreite der mittleren 50 % der Messwerte beschreibt, ist bei den Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm identisch. Die Länge der Whisker hingegen unterscheiden sich um 1 dBm, wodurch die Streuung bei der Sendeleistung -8 dBm etwas geringer ausfällt. Eine deutlich größere Streuung zeigen auch die bei einer Sendeleistung von -12 dBm gemessenen Werte. Weiter kann beobachtet werden, dass unter Einsatz des Estimote SDKs die Messwerte nicht vollkommen symmetrisch um den Median streuen. Während bei +4 dBm

und -8 dBm nur geringe Abweichungen festzustellen sind, ist bei der Sendeleistung -12 dBm eine asymmetrische Streuung deutlich ersichtlich. Dies deutet darauf hin, dass die Signale bei geringeren Sendeleistungen nicht normalverteilt sind. Fehlmessungen, mithilfe des RSSI-Werts -100 repräsentiert, treten maximal mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,31 % auf.

Angesichts der hohen Streuwerte bei einer Sendeleistung von -12 dBm in beiden untersuchten Umgebungen (Framework/SDK), ist diese für die weitere Überlegung nicht relevant. Abbildung 6.6 stellt die übrigen zwei Sendeleistungen gegenüber und zeigt, an welchen Stellen sie sich unterscheiden. Bei Betrachtung der ersten beiden Box-Whisker-Plots, die die gemessenen Signalstärken bei einer Sendeleistung von +4 dBm darstellen, fällt auf, dass der Median in beiden Darstellungen bei -56 dBm liegt. Die Boxen unterscheiden sich lediglich darin, dass sich die 3. Quartile mit -54 dBm (CL) und -53 dBm um 1 dBm unterscheiden. Beim Vergleich der Whisker-Längen ist Ähnliches zu beobachten. Auch hier unterscheiden sich die beiden pro Whisker um 1 dBm. Dahingegen herrschen starke Unterschiede in der Anzahl der Ausreißer. Das Core Location Framework verzeichnet sowohl bei den milden als auch extremen Ausreißern eine große Anzahl, die sich überwiegend im Bereich außerhalb des linken Whiskers (kleiner -63 dBm) befinden. Die Messungen des Estimote SDKs zeigen lediglich einen milden Ausreißer bei -67 dBm und einen extremen Ausreißer bei -100 dBm, der die Fehlmessungen repräsentiert. In gleicher Art unterscheiden sich die RSSI-Werte bei eingestellter Sendeleistung von -8 dBm. Damit kann im Allgemeinen gesagt werden, dass die RSSI-Werte bei Sendeleistungen von +4 dBm und -8 dBm unter Verwendung des Core Location Framework eine etwas geringere Streuung haben, stattdessen allerdings eine sehr große Anzahl von Ausreißer aufweisen. Diese sind im gewünschten Einsatzszenario einer Indoor-Positionierung und späteren -Navigation nicht praktikabel, da sie dem Erwartungswert nicht entsprechen und damit den tatsächlichen Abstand zum Beacon nicht vertreten.

Ein weiterer Nachteil des Core Location Frameworks ist die bereits angeführte Updatefrequenz von 1 Hz. Bei fluktuierenden Signalen ist es wichtig viele Werte zu messen, um die tatsächliche Signalstärke an der gegebenen Entfernung möglichst genau schätzen zu können. Dies kann mit dem *Gesetz der großen Zahlen* verglichen werden. Es besagt, dass sich mit der Anzahl der Wiederholung eines Experiments der Mittelwert gegen den Erwartungswert konvergiert. [Bew11] Das angesprochene Experiment kann in diesem Szenario mit dem Messen der Signalstärke gleichgesetzt werden.

Liegt eine Fehlmessung vor, kann in dieser Sekunde keine Schätzung stattfinden, da die einzigen übermittelten Daten nicht verwendet werden können. Das Estimote SDK liefert hingegen mit einer Frequenz von 5 Hz Advertising-Pakete und kann aus diesem Grund einerseits gegebenenfalls auftretende Fehlmessungen besser kompensieren, andererseits ist es möglich, hierüber den Erwartungswert zuverlässiger anzunähern.

Aus den hier genannten Gründen wird für weitere Untersuchungen das Estimote SDK eingesetzt. Das folgende Kapitel erweitert den hier beschriebenen Versuchsaufbau um größere Abstände zwischen *iBeacon* und Empfänger sowie um Messungen in verschiedenen Winkeln und Orientierungen zum Beacon.

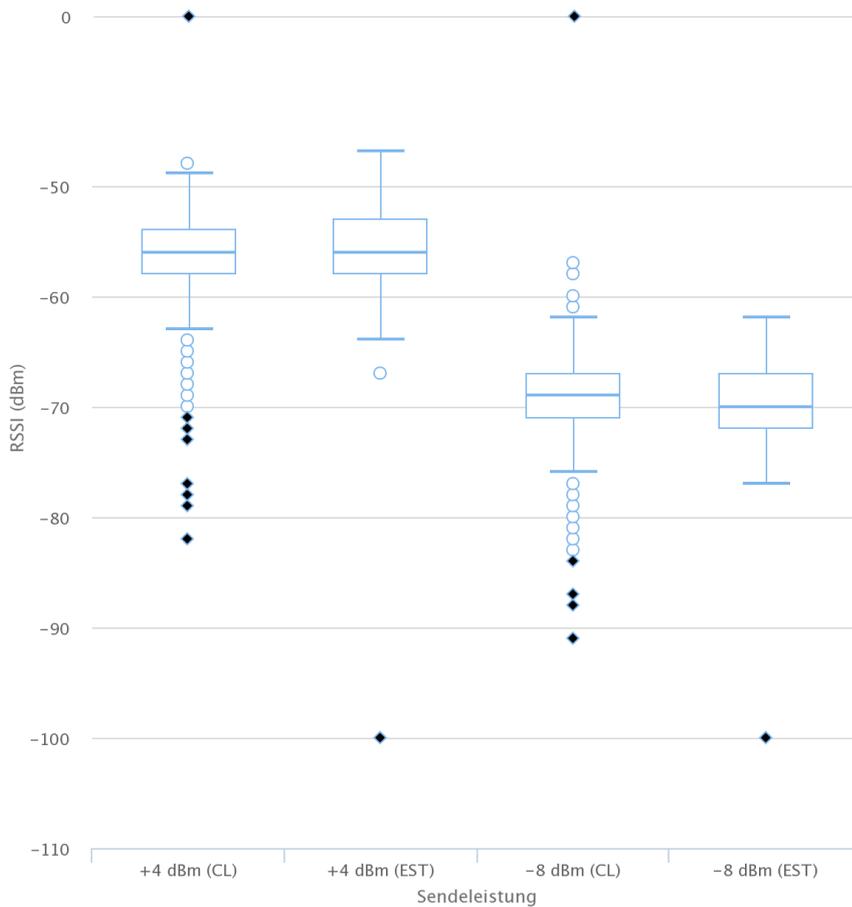


Abbildung 6.6: Vergleich der Signalverteilungen bei Sendeleistungen von +4 dBm und -8 dBm im Core Location Framework (CL) und Estimote SDK (EST).

6.2 Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten

Der vorangegangene Abschnitt hat herausgestellt, worin die Unterschiede in der Streuung der RSSI-Werte bei Verwendung unterschiedlicher Software und Sendeleistungen liegen. Es hat sich gezeigt, dass das Estimote SDK für den Einsatz in einem Indoor-Positionierungssystem besser geeignet ist. Im Folgenden wird der zuvor angewandte Versuchsaufbau dahingehend erweitert, dass untersucht werden kann, ob die gemessenen Signalstärken durch den Winkel, in dem der Benutzer zum Beacon steht, oder dessen Orientierung beeinflusst wird. Dies ist von großer Bedeutung, da auf Grundlage der Signalstärken eine Abstandsschätzung umgesetzt werden soll. Optimal wäre eine vom Winkel und der Orientierung unbeeinflusste empfangene Signalstärke.

Abbildung 6.7 zeigt den Versuchsaufbau für die folgenden Untersuchungen. Das *iBeacon* wird erneut in einer Höhe von 1,40 m an der Position (4,1 | 0) des Aufenthaltsraumes (vgl.

Beacon B1 Abschnitt 5.2.1) angebracht. Zur Erweiterung der Distanz werden drei Radien in den Abständen 1 m, 2 m und 3 m um die Position des Beacon gezogen (blaue Halbkreise). Zur Analyse der Winkelabhängigkeit findet eine Unterteilung der drei Radien in gleichmäßigen Abständen von 15° statt, sodass die Messpunkte (39) durch die Schnittpunkte der Radien und der jeweiligen Winkel definiert sind. Wie die zuvor durchgeführten Tests ge-

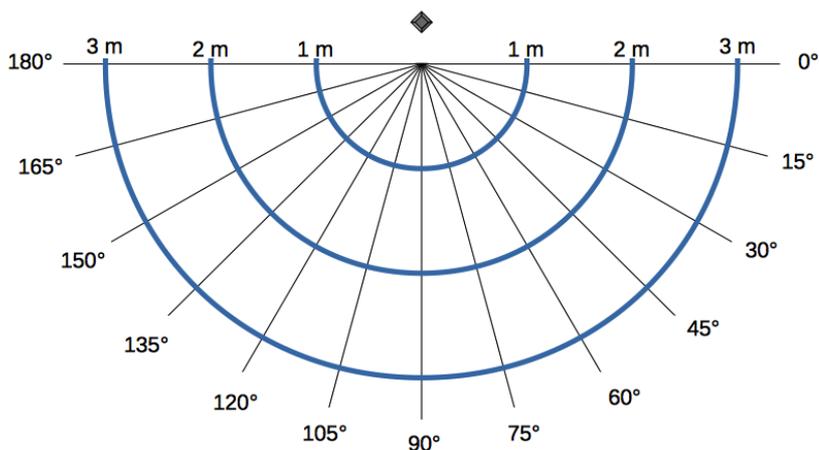


Abbildung 6.7: Versuchsaufbau Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten.

zeigt haben, ist die Sendeleistung -12 dBm auf Grund der gemessenen hohen Streuung der RSSI-Werte nicht geeignet. Aus diesem Grund kommen hier die Sendeleistungen $+4\text{ dBm}$ und -8 dBm zum Einsatz. Pro Sendeleistung und Messpunkt erfolgt eine Messung mit einer Strichprobengröße von 100 Werten.

6.2.1 Winkelabhängige Messungen bei frontaler Ausrichtung

Dieser Abschnitt untersucht zunächst die Signalausbreitung unter den genannten Sendeleistungen $+4\text{ dBm}$ und -8 dBm . Hierbei ist der Empfänger, ein iPod touch der 5ten Generation, stets unmittelbar auf das Beacon gerichtet (frontal).

+4 dBm

Abbildung 6.8 beschreibt die mittlere Signalstärke der 100 Messwerte. Um gegen Ausreißer robuste Mittelwerte zu erhalten, werden diese durch den Median oder auch Zentralwert dargestellt. Jeder der zuvor definierten Winkel wird in der Abbildung durch eine Spalte mit je drei Messwerten für die Entfernungen 1 m, 2 m und 3 m dargestellt. Es zeigt sich, dass beispielsweise bei 90° eine klare Abstufung zwischen den drei Distanzen vorherrscht und die Signalstärke mit steigendem Abstand deutlich geringer wird. Ein gleiches Verhalten ist bei 0° , 180° , 135° und 45° zu beobachten. An anderen Winkeln (120° , 30° , 15°) ist lediglich eine geringe Differenz von maximal 2 dBm zwischen den mittleren Signalstärken der jeweiligen Abständen zu verzeichnen, was die Unterscheidung zwischen den Abständen massiv

erschwert. Ein häufiges Phänomen ist allerdings, dass zwar deutliche Abstufungen in der Ausprägung zwischen 1 m und 2 m existieren, die Unterscheidung bezogen auf die mittlere Signalstärke zwischen 2 m und 3 m fällt jedoch schwer (vgl. Winkel 165°, 150°, 105°, 75° und 60°).

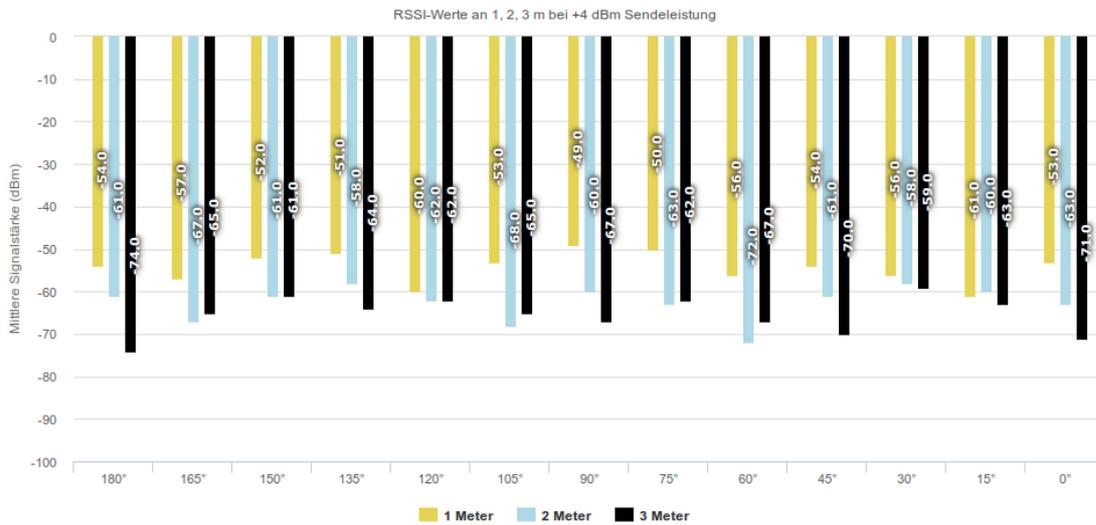


Abbildung 6.8: Winkelabhängige Messungen bei frontaler Ausrichtung und einer Sendeleistung von +4 dBm.

Beim Vergleich der Distanzbereiche³ der drei Radien wird deutlich, dass kein fester Wertebereich für einen Abstand existiert. Wie Tabelle 6.1 zeigt, überlagern sich die Bereiche zwischen dem größten und dem kleinsten Mittelwert vielmehr. Dies gilt besonders für die Radien 2 m und 3 m.

Radius (m)	Minimum (dBm)	Maximum (dBm)
1	-49	-61
2	-58	-72
3	-59	-74

Tabelle 6.1: Überlagerung der Distanzbereiche bei +4 dBm.

-8 dBm

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der Messungen mit einer Sendeleistung von -8 dBm dar. Im Vergleich zum vorangegangenen Abschnitt, repräsentieren die in Abbildung 6.9 ge-

³Bereich zwischen dem größten und kleinsten Messwert an einem gegebenen Radius.

6. SIGNALUNTERSUCHUNGEN

zeigten Werte den Median einer Messung mit 100 Messwerten. Bei Betrachtung dieser fällt auf, dass an 46 % der Winkel (180°, 165°, 165°, 105°, 90°, 0°) eine Abschwächung der empfangenen Signalstärke analog der zunehmenden Abstände zwischen Beacon und Empfänger zu verzeichnen ist. Diese ist jedoch teilweise sehr gering und beträgt beispielsweise bei 135° zwischen 1 m und 2 m und zwischen 2 m und 3 m lediglich 2 dBm. Bei 90° ist die Differenz zwischen den mittleren Signalstärken an 2 m und 3 m Entfernung lediglich 1 dBm. An den Winkeln 90° und 45° wird für die beiden Radien 2 m und 3 m exakt die selbe mittlere Signalstärke gemessen. Das selbe Phänomen tritt bei 15° für die Radien 1 m und 2 m auf.

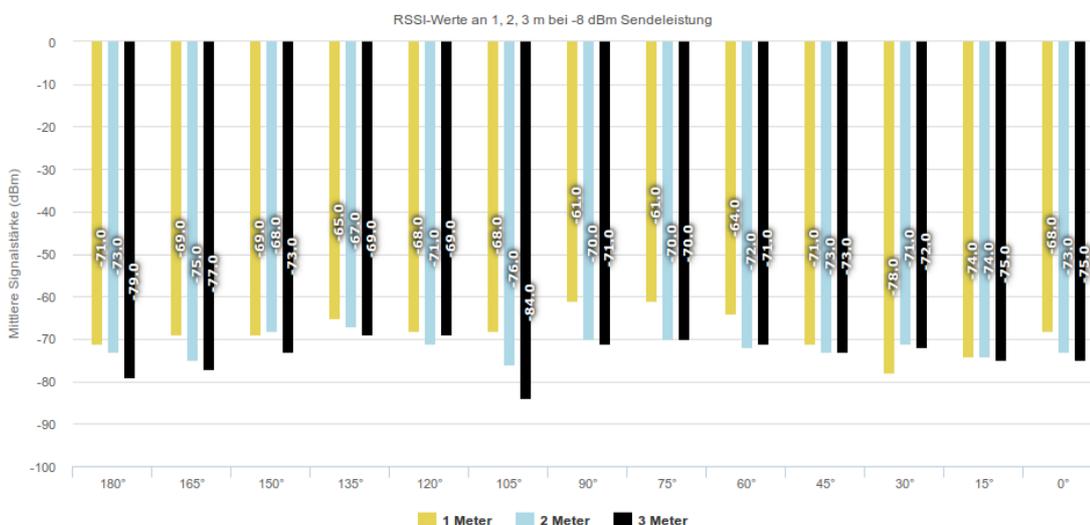


Abbildung 6.9: Winkelabhängige Messungen bei frontaler Ausrichtung und einer Sendeleistung von -8 dBm.

Die in in Tabelle 6.2 dargestellten Distanzbereiche zeigen, dass an den drei Radien weitestgehend ähnliche Signalstärken gemessen werden.

Radius (m)	Maximum (dBm)	Minimum (dBm)
1	-61	-78
2	-67	-76
3	-71	-84

Tabelle 6.2: Überlagerung der Distanzbereiche bei -8 dBm

6.2.2 Signalstärkeabweichungen bei Ausrichtungsänderung

Dieser Abschnitt untersucht die Signalstärkeabweichungen bei veränderter Ausrichtung exemplarisch bei einer Sendeleistung von +4 dBm. Hierzu werden die in Abbildung 6.1 darge-

stellten Messpunkte um die Orientierungen „tangential“ und „rückwärts“ erweitert und mit den in Abschnitt 6.2.1 dargestellten Messwerten der frontalen Ausrichtung verglichen (vgl. Abbildung 6.10). Da prinzipiell zwei tangentielle Ausrichtungen existieren, sei an dieser Stelle erwähnt, dass in diesem Szenario ausschließlich die in Abbildung 6.10 dargestellte Richtung in die Messungen eingeht.

Wie bereits herausgestellt, ist ein Sichtkontakt (LOS) für die Genauigkeit der Signalmessung essentiell. Trotzdem kann dieser nicht in 100 % der Fälle zu allen Beacons gewährleistet sein, weshalb an dieser Stelle die RSSI-Werte bei geänderter Ausrichtung analysiert werden.

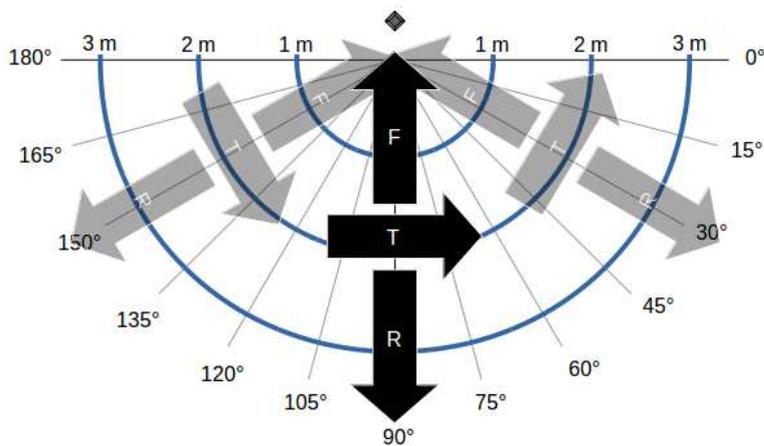


Abbildung 6.10: Darstellung der Orientierungen.

Tangential

Die in Anhang C.1 dargestellten Ergebnisse zeigen die Unterschiede in der gemessenen Signalstärke an den gegebenen Winkeln auf. An einem Abstand von 1 m ist bei tangentialer Ausrichtung an den Winkeln von 180° bis 90° (linke Seite) im Mittel stets eine geringere Signalstärke zu verzeichnen als bei frontaler Ausrichtung. Die Abweichungen belaufen sich hierbei auf 3 dBm (165°, 150°) bis 8 dBm (135°). Ab einem Winkel von 75°, mit Ausnahme von 0°, ist Gegenteiliges zu beobachten. Hier ist die mittlere Signalstärke an besagten Winkeln geringfügig besser (1 bis 8 dBm) als bei frontaler Ausrichtung. Die Ausnahme von 8 dBm bildet der Winkel 15° (vgl. Abbildung C.1). Die Messung eines etwas geringeren RSSI-Wertes bei einem Winkel von 0° könnte darin begründet sein, dass sich der Empfänger direkt zwischen Wand und Körper befindet und es hierdurch zu einer Abschirmung der Signale und einer Verringerung der Signalstärke kommen könnte.

Bei einem Abstand von 2 m ist keine stetig höhere oder niedrigere Signalstärke in Abhängigkeit der Winkel festzustellen. Die Differenzen zwischen der mittleren Signalstärke bei frontaler und tangentialer Ausrichtung belaufen sich auf 2 dBm bis 5 dBm. Ausreißer sind an den äußeren Positionen bei 165° und 0° zu beobachten. An diesen Winkeln wird eine deutlich geringere Signalstärke gemessen (8 dBm und 13 dBm)(vgl. Abbildung C.2). Ähnlich sieht es bei einer Entfernung von 3 m zum *iBeacon* aus, die in Abbildung C.3 dargestellt

werden. Die Differenzen bewegen sich hier in einem Rahmen von 0 bis 9 dBm, wobei die größte Abweichung von 9 dBm bei 30° gemessen wird. Allerdings ist an diesem Winkel die mittlere gemessene Signalstärke mit -59 dBm die höchste der frontalen Messungen, wodurch diese weniger ins Gewicht fällt.

Trotz der dargestellten Abweichungen zwischen frontaler und tangentialer Ausrichtung, können diese als zufällig bezeichnet werden. Die Ergebnisse der in Anhang C.2 dargestellten t-Tests für die Radien 1 m, 2 m und 3 m zeigen dies deutlich. Zwischen den zwei verbundenen Testgruppen kann kein signifikanter Unterschied an den Winkeln nachgewiesen, da die berechneten Irrtumswahrscheinlichkeiten p mit 20,2 %, 26,1 % und 47,9 % weit über der maximal zulässigen von 5 % liegen. Für die Überprüfung kommt an dieser Stelle der t-Test zum Einsatz, da die Stichproben der RSSI-Werte einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen (vgl. Anhang D.1) und die mittleren RSSI-Werte an frontaler und tangentialer Ausrichtung verbundene Stichproben sind.

Rückwärts

Die Unterschiede der gemessenen mittleren Signalstärken zwischen frontaler und abgewendeter Ausrichtung (rückwärts) sind bei einem Abstand von 1 m beachtlich (vgl. Abbildung C.1). Mit Ausnahme der Messergebnisse an den Winkeln 180°, 30°, 15° und 0° liegen die Differenzen bei mindestens 10 dBm. Im Mittel sind die Messungen an dieser Entfernung 11,15 dBm geringer als bei frontaler Ausrichtung. Wie in Abbildung C.2 zu sehen ist, sind die mittleren Signalstärken bei einem Abstand von 2 m zwar überwiegend geringer als bei frontaler Ausrichtung, jedoch ist die mittlere Differenz mit 4,9 dBm deutlich geringer. Sehr ähnlich, wenn auch im Mittel mit 5,7 dBm etwas höher, sind die Abweichungen bei einer Distanz von 3 m.

Die Signifikanz der Abweichungen wird in Anhang C.3 geprüft. Wie bereits beim Vergleich der tangentialen mit der frontalen Ausrichtung, kommt zur Überprüfung der t-Test zum Einsatz. Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen den Mittelwerten sehr signifikant sind. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten, dass zwischen den beiden Gruppen ein signifikanter Unterschied besteht, liegt an den Radien 1 m, 2 m und 3 m bei unter 0,1 %, 0,5 % und 1,1 %.

Ferner kann beobachtet werden, dass sich die Anzahl der Fehlmessungen (-100 dBm) besonders bei einer Entfernung von 1 m und vom Sender abgewendeter Ausrichtung (rückwärts) signifikant erhöht. Bei der Analyse der RSSI-Werte können von 1300 Messwerten 34 Fehlmessungen ausgemacht werden. Als Vergleich werden bei frontaler Ausrichtung 5 von insgesamt 1600 Messwerten als Fehlmessungen identifiziert (vgl. 6.1.2). Nach dem in Anhang C.4 durchgeführten χ^2 -Test besteht eine signifikante Abhängigkeit zwischen den Merkmalen „Ausrichtung“ und „Fehlmessungen“. Damit hat die Ausrichtung des Empfängers eine nachweisbare Auswirkung auf die Intensität der empfangenen Signalstärke.

Etwas geringere Häufigkeiten werden an den übrigen Abständen gemessen. Bei 2 m sind dies 23 Fehlmessungen, bei 3 m werden 27 von 1300 Messwerten als fehlerhafte Messungen bewertet. Berechnung (C.2) zeigt, dass auch am Radius 2 m ein signifikanter Unterschied zwischen den bereits genannten Merkmalen besteht. Da die Fehlmessungen am Radius 3 m

eine höhere Häufigkeit als am Radius 2 m aufweisen, gilt der signifikante Unterschied im gleichen Maße für diesen dritten Radius.

6.2.3 Zwischenfazit Winkel- und Orientierungsabhängigkeiten

Abschnitt 6.2.1 hat gezeigt, welche Signalstärken im Mittel an 13 verschiedenen Winkeln und drei unterschiedlichen Abständen zum Sender gemessen werden. Hierbei stellt sich heraus, dass sich bei zuvor qualifizierten Sendeleistungen an weniger als 50 % der Winkel die Abstände innerhalb eines Winkels anhand der mittleren gemessenen Signalstärken erkennen lassen. Bei beiden Sendeleistungen ist ein häufiges Problem, dass keine Unterscheidung auf Grundlage der Signalstärke erfolgen kann, da sich entweder die Signalstärken zwischen 2 m und 3 m zu gering unterscheiden oder gar alle drei Radien keine wesentlichen Unterschiede aufweisen. Teilweise werden an größeren Abständen höhere Signalstärken gemessen.

Im Vergleich aller Winkel untereinander zeigt sich weiterhin eine große Schnittmenge der Distanzbereiche. Hierdurch lassen sich die Abstände, ohne Kenntnis über den Winkel, in dem der Benutzer zum Beacon steht, nur sehr grob schätzen. Dies führt in einem Indoor-Positionierungssystem zwangsläufig zum Verlust der Genauigkeit.

Als Fazit der Orientierungsabhängigkeiten bleibt festzuhalten, dass die Abweichungen bezüglich der gemessenen Signalstärke bei tangentialer Ausrichtung und einer Sendeleistung von +4 dBm im Rahmen der in Abschnitt 6.1.2 gezeigten Streuung liegt. Des Weiteren können auf Grund der Ergebnisse des Signifikanztests (t-Test) die gemessenen Abweichungen bei tangentialer Ausrichtung als zufällig angesehen werden (vgl. Anhang C.2). Das Phänomen, dass bei einer Entfernung von 1 m die mittleren Signalstärken auf der linken Seite des Beacons stets geringer und auf der rechten Seite mit Ausnahme der Signalstärke am Winkel 0° stets höher ist als bei frontaler Ausrichtung, kann damit erklärt werden, dass an den Winkeln auf der linken Seite im Ansatz eine Messung in abgewendeter Ausrichtung stattfindet. Hierdurch können überwiegend die Signalwellen des direkten Sichtkontaktes empfangen werden. Die reflektierten Wellen der Wand werden wahrscheinlich vom Körper des Benutzers absorbiert.

Vom Sender abgewendete Messungen (rückwärts) zeigen hingegen an allen Radien eine signifikant niedrigere Signalstärke (vgl. t-Test in Anhang C.3). Die Signalstärken erfahren hierbei im Mittel eine Verringerung von 11,14 dBm. Weiterhin ist bei dieser Ausrichtung ein signifikanter Anstieg von Fehlmessungen zu erkennen. Anhand des χ^2 -Tests in Anhang C.4 wird deutlich, dass die Merkmale „Fehlmessung“ und „Ausrichtung“ von einander abhängig sind. Um einer Verfälschung der mittleren Signalstärke, gerade bei geringen Stichprobengrößen, entgegenzuwirken, gilt es diese in einem künftigen Indoor-Positionierungssystem zu filtern und nicht in die Berechnung einfließen zu lassen.

6.3 Zwischenfazit Signalstärkeuntersuchungen

Das Estimote SDK hat sich im Vergleich mit dem Core Location Framework aus verschiedenen Gründen als besser geeignet herausgestellt. Zum einen konnten bei den Signalmessungen

bei annähernd identischer Streuung nahezu keine Ausreißer festgestellt werden. Zum anderen haben Fehlmessungen eine sehr viel geringere Auftrittswahrscheinlichkeit als im Core Location Framework. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die im Estimote SDK erhöhte Updatefrequenz von 5 Hz, mit der RSSI-Werte zurückgegeben werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass unter dem Einsatz der Sendeleistung -12 dBm eine sehr hohe Streuung gemessen wird und damit für den Einsatz in einem Positionierungssystem nicht geeignet ist. Die Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm zeigen hingegen annähernd identische Streuungen um den Mittelwert.

Insgesamt bleibt zu sagen, dass neben der Signalstreuung, die ohnehin eine exakte Messung erschwert und die Unterscheidung zwischen den Radien beschränkt, ebenso unterschiedliche Winkel zum Sender und eine abgewendete Orientierung die gemessene Signalstärke stark beeinflussen können. Die Abweichungen bei tangentialer Ausrichtung zum Sender können als zufällig betrachtet werden. Hierdurch ist es möglich, den Abstand zum Beacon lediglich anzunähern, was bei Verwendung des Trilaterationsverfahrens dazu führt, dass sich die drei Radien nicht in einem Punkt schneiden, sondern eine Fläche aufspannen, die als Ergebnismenge für mögliche Positionierungen steht (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Auftrittswahrscheinlichkeit für Fehlmessungen ist signifikant Abhängig von der Ausrichtung (frontal und rückwärts).

Das folgende Kapitel beschreibt die Umsetzung eines Indoor-Positionierungssystems auf Grundlage der hier gewonnenen Erkenntnisse. Zusätzlich werden verschiedene Parameter wie zum Beispiel die Anzahl und das Auswahlverfahren der Beacons hinsichtlich der daraus resultierenden Güte der Positionsbestimmung evaluiert.

Kapitel 7

Indoor-Positionierungssystem

Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Indoor-Positionierungssystems auf Basis der *iBeacon*-Technologie. Hierzu werden zunächst die nötigen Grundlagen für die Kalibrierung des Verlustmodells und Lösung der Trilateration erarbeitet. Anschließend folgt eine Aufstellung verschiedener Parameter, deren möglichen Einflüsse auf die Genauigkeit der Positionsschätzung getestet werden. Sie dienen gleichzeitig als funktionale Anforderungen für die Umsetzung des Prototypen für das Betriebssystem iOS. Abschließend folgt eine Evaluation der zuvor definierten Parameter anhand der Test- bzw. Positionierungsergebnisse.

7.1 Vorüberlegungen

Im Folgenden werden die für die Umsetzung des Systems notwendigen mathematischen Grundlagen erarbeitet und beschrieben.

7.1.1 Kalibrierung und Abstandsschätzung zum iBeacon

Das Grundlagenkapitel hat bereits erläutert, aus welchen Gründen ein Verlustmodell für die Beschreibung der Signalausbreitung wichtig ist. Bedingt durch die Phänomene Reflexion, Absorption, Streuung und Beugung kommt es zum sogenannten Mehrwegempfang, der zu Interferenzen führt. Hierdurch kann die gemessene Signalstärke beim Eintreffen der elektromagnetischen Wellen verstärkt oder abgeschwächt werden. Die Auswirkungen wurden in Kapitel 6 ausführlich dargestellt. Um diese Einflussfaktoren abbilden und eine möglichst exakte Schätzung der Entfernung durchführen zu können, ist ein Verlustmodell notwendig, das ebenfalls im Grundlagenkapitel eingeführt wurde (vgl. Abschnitt 3.3.1). Voraussetzung für den Einsatz ist eine zugrunde liegende Normalverteilung der Signalwerte. Die Abbildung D.1 im Anhang zeigt, dass die gemessenen Signalstärken (ohne Fehlmessungen) einer Normalverteilung unterliegen, was die Anwendung des Log-distance Path-Loss Model prinzipiell gestattet. Des Weiteren liefert dieses Verlustmodell in den von Salas durchgeführten Tests zur Abstandsschätzung die besten Ergebnisse [Sal14], weshalb es auch in dem hier entwickelten System seine Anwendung findet. Die Gleichung (7.1) ist das Resultat der bereits

gezeigten Umformung der Formel für den Pfadverlust $P_L(d)$ an einem gegebenen Abstand d (vgl. Abschnitt 3.3.1):

$$d_{\text{Schätzung}} = d_0 \cdot 10^{(RSSI_0 - RSSI - X_\sigma / 10 \cdot n)} \quad (7.1)$$

Der Verwendung geht eine Offline- oder Trainingsphase voran, um den Parameter n bestimmen zu können. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, existieren hierfür drei verschiedene Techniken, die in [Sal14] verglichen und deren Vor- und Nachteile erarbeitet werden. Folgende Tabelle stellt noch einmal das Ergebnis der Untersuchung im Überblick dar. Zwar werden mithilfe der Punktkalibrierung basierend auf 'Proximity' bessere Positio-

Kalibrierungsart	Positionierungsgenauigkeit	Aufwand
Punktkalibrierung	mittel bis gut	mittel bis gering
Punktkalibrierung basierend auf 'Proximity'	gut	hoch
Umgebungs-kalibrierung	schlecht	sehr hoch

Tabelle 7.1: Vergleich der Kalibrierungsarten

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Sal14]

nierungen erreicht, allerdings wird der Aufwand bei n^2 Kalibrierungen mit $n \in \mathbb{N}^+$ für ein Warenlager als viel zu hoch eingeschätzt. Die Umgebungskalibrierung ähnelt einer Radio Map und hat damit einen weitaus höheren Aufwand als die Punktkalibrierung basieren auf 'Proximity' bei gleichzeitig schlechteren Positionierungsergebnissen. Darüber hinaus wurden Radio Maps bzw. das Fingerprinting-Verfahren bereits in Kapitel 4 argumentativ abgelehnt. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf die einfache Punktkalibrierung eingesetzt. Sie verspricht einerseits mittlere bis gute Ergebnisse, andererseits wird der Aufwand gering gehalten.

Das Flussdiagramm in Abbildung D.2 beschreibt die Durchführung der Punktkalibrierung für ein Beacon. Hierbei wird zunächst der Kalibrierungspunkt KP bestimmt und das zu kalibrierende Beacon B gewählt. Anschließend ist die Euklidische Distanz zwischen den beiden Positionen B und KP mithilfe des Satz des Pythagoras zu ermitteln (vgl. Formel (7.2)).

$$d(B, KP) = d_{\text{real}} = \sqrt{(x_B - x_{KP})^2 + (y_B - y_{KP})^2} \quad (7.2)$$

Aus der hiernach durchzuführenden Stichprobe von Signalstärkemessungen (beispielsweise 75 Werte) wird die Streuung mithilfe der Standardabweichung Xg ermittelt. Aus der Literaturanalyse und dem Grundlagenkapitel geht hervor, dass der Path-Loss Exponent n für die darauffolgende Abstandsschätzung elementar ist. Die Bestimmung erfolgt unter Verwendung

des mittleren quadratischen Fehlers (MSE^1) [Sal14, S. 42], der die Qualität des Schätzers (hier Path-Loss Exponent n) durch „die Erwartungstreue sowie eine[r] möglichst niedrige Varianz des Schätzers bestimmt.“ [Bew11] Die Formel (7.3) zeigt die Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers in der Umgebung der Punktkalibrierung.

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_m (d_{\text{Schätzung}} - d_{\text{real}})^2 \quad (7.3)$$

Der Parameter m beschreibt in dieser Formel die Anzahl der Messwerte. Der Path-Loss Exponent wird iterativ bestimmt. Zunächst wird ein sehr kleiner Exponent (beispielsweise 0,3) gewählt, mit dieser Wahl für jeden RSSI-Wert der Stichprobe der Abstand geschätzt ($d_{\text{Schätzung}}$) und in Folge der dazugehörige MSE bestimmt. Anschließend wird der Exponent n um 0,1 erhöht und mit diesem erneut der zugehörige mittlere quadratische Fehler ermittelt. Gewählt wird abschließend der Exponent mit dem kleinsten zugehörigen MSE.

Der benötigte Parameter $RSSI_0$ kann ebenfalls empirisch ermittelt werden. Hierzu werden am Abstand d_0 von 1 m RSSI-Werte gemessen und hiervon der Mittelwert gebildet, der die Referenzsignalstärke $RSSI_0$ vertritt. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, diese Werte aus dem *iBeacon*-Protokoll zu extrahieren. Sie sind neben dem gelieferten RSSI-Wert Bestandteil und werden vom Beacon-Hersteller vorkonfiguriert (vgl. Kapitel 3.5). Die zum Zeitpunkt der programmatischen Umsetzung des Indoor-Positionierungssystems eingesetzte Version 2.4.0 des Estimote SDKs liefert diese Attribute nicht, da die eingesetzte Methode `didRangeBeacons` ausschließlich auf dem Core Bluetooth Framework aufbaut. Aus diesem Grund werden sie an dieser Stelle empirisch ermittelt.

Nach Bestimmung aller nötigen Parameter der Formel (7.1), kann die Abstandsschätzung an unbekannt Positionen zum *iBeacon* erfolgen.

7.1.2 Positionsbestimmung mithilfe des (Tri-)Lateration-Verfahrens

Der vorherige Abschnitt hat gezeigt, was zur Abstandsschätzung zu einem Beacon notwendig ist. Um die Position in der Ebene eindeutig zu ermitteln, müssen die genauen Abstände zu mindestens drei Beacons bekannt sein. Darauf folgend ergibt sich das Problem, die Schnittpunkte der ermittelten Abstandsradien und somit die Trilateration zu berechnen.

Die euklidischen Abstände r_1 , r_2 und r_3 zwischen der unbekannt Position $(x | y)$ und der Beacons $B_1 (x_1 | y_1)$, $B_2 (x_2 | y_2)$ und $B_3 (x_3 | y_3)$ lassen sich wie folgt beschreiben:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= r_3^2 \end{aligned} \quad (7.4)$$

Die hier gezeigten quadratischen Gleichungen sind im Allgemeinen schwer zu lösen. Aus diesem Grund wird mithilfe einer Umformung, bei der eines der Beacons als „Linearisierungs-

¹Mean Square Error

Tool“ verwendet wird, eine Linearisierung der Gleichungen hin zu einem Linearen Gleichungssystem (LGS) vorgenommen, das im Allgemeinen leichter lösbar ist. Wird hierbei Beacon B1 als Tool verwendet, ergibt sich folgendes LGS in Matrixschreibweise: [MJ07, S. 8 f.]

$$A\vec{x} = \vec{b} \quad (7.5)$$

mit

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 \end{pmatrix}, \vec{x} = \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{pmatrix}, \vec{b} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_1^2 - r_2^2 + d_{21}^2 \\ r_1^2 - r_3^2 + d_{31}^2 \\ \vdots \\ r_1^2 - r_n^2 + d_{n1}^2 \end{pmatrix} \quad (7.6)$$

Dabei bezeichnet x_n und y_n die Koordinaten des Beacons n . r_n beschreibt die Distanz zwischen dem Empfänger und dem Beacon, d_{n1} hingegen die Distanz zwischen Beacon 1 und Beacon n . Stehen mehr als drei Beacons zur Verfügung, wird die Matrix A und der Vektor \vec{b} um die jeweilige Zeile erweitert.

Wie bereits erwähnt, müssen zur eindeutigen Lösung des Gleichungssystems exakte Abstandsmessungen vorliegen, die in der Praxis nicht erreicht werden. Hierdurch entsteht statt eines Schnittpunktes der Radien eine Schnittmenge mit möglichen Positionen, wodurch das LGS nicht mehr eindeutig lösbar ist und eine Ausgleichsrechnung stattfinden muss. Aus diesem Grund wird die Methode der kleinsten Quadrate (LSQ²) zur näherungsweisen Lösung des Systems eingesetzt ($A\vec{x} \approx \vec{b}$). [MJ07, S. 18] Diese näherungsweise Lösung wird so gewählt, dass die Summe der Fehlerquadrate (Residuen) minimiert werden. [Bew11, S. 238 ff.] [MJ07, S. 18]

In [Sal14] wird neben der linearen Methode ein weiterer nicht-linearer Ansatz zur näherungsweisen Lösung des Gleichungssystems beschrieben. Allerdings liefert dieser mit der von Salas für Android entwickelten Testanwendung für drei Beacons etwas schlechtere Ergebnisse und hat einen höheren Berechnungsaufwand. [Sal14, S. 51] Aus diesem Grund kommt in der im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzten Test-App die lineare Variante der Methode der kleinsten Quadrate zum Einsatz.

7.2 Testparameter

Dieser Abschnitt dient der Vorstellung einer begründeten Auswahl von Testparametern, welche die Positionsbestimmung beeinflussen können.

²Least Linear Squares

Wie in Tabelle 7.2 zu sehen, soll der Einsatz von mehr als 3 Beacons getestet werden. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung könnte hierdurch positiv beeinflusst werden, weshalb die Anzahl der eingesetzten Beacons ein wichtiger Untersuchungsparameter ist. Des Weiteren haben sich in Kapitel 6 die Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm für den Einsatz in einem Positionierungssystem als geeignet herausgestellt. Durch die weitere Untersuchung im System könnte sich eine Sendeleistung als besser geeignet erweisen. Bei der Verwendung

Parameter	Werte
Anzahl der Beacons	3, 4, 5, 6
Sendeleistung	+4 dBm, -8 dBm
Beacon-Filter	kein, 'strong', 'reliable'
Berechnungsart	Multilateration, Multiple Trilateration

Tabelle 7.2: Testparameter

von drei Beacons, müssen alle in die Berechnung der Trilateration eingehen. Sofern mehr als drei zur Verfügung stehen stellt sich die Frage, ob alle Beacons zur Lösung für das in der Formel (7.5) gezeigte LGS zu verwenden oder die Auswahl der Beacons einer Filterung zu unterziehen ist. Die Idee der Filterung beruht darauf, dass zu nahe gelegenen Beacons eine genauere Abstandsschätzung erfolgen kann. [QZX⁺12] [Sal14, S. 43] Von nahe gelegenen Beacons wiederum ist die empfangene Signalstärke höher als von weit entfernten. Des Weiteren ist eine Filterung der Beacons beim Einsatz im Warenlager von großer Bedeutung. Gegeben sei das Szenario, dass sich ein Kommissionierer in einem Lagergang befindet und seine aktuelle Position ermitteln möchte. In diesem Fall kann es vorkommen, dass er neben den *iBeacons*, die sich im selben Gang befinden, auch solche empfängt, die zur Lokalisierung in den Nachbargängen angedacht sind. Beim Einbeziehen dieser Beacons der Nachbargänge in die Berechnung, würden die gleichen Probleme auftreten, wie bei den in Kapitel 4 bereits behandelten WLAN-basierten Systemen. Die Positionsschätzung würde unter anderem auf Grundlage von Signalstärken erfolgen, die durch Lagerregale und Ware einer unbekanntenen Dämpfung unterzogen wurden. Die Signalstärken der Beacons im gleichen Gang werden lediglich durch die beschriebene Freiraumdämpfung beeinflusst. Aus diesem Grund ist es essentiell, eine Filterung der empfangenen Beacons anhand der Signalstärke vorzunehmen. Zusätzlich ist es hierdurch möglich, sofern zu genügend Beacons ein Sichtkontakt besteht, solche Beacons des gleichen Gangs zu filtern, zu denen kein Sichtkontakt besteht. Kapitel 6 hat gezeigt, wie stark die RSSI-Werte bei abgewendeter Ausrichtung beeinflusst werden. Der in der Tabelle aufgeführte Filter 'strong' nimmt zunächst eine Sortierung der Beacons anhand der mittleren empfangenen Signalstärke vor. Da mindestens drei Beacons zur Lösung der Trilateration zur Verfügung stehen müssen, werden die weiteren Beacons nur dann in die Berechnung aufgenommen, wenn deren mittlerer RSSI-Wert nicht mehr als 15 % vom RSSI-Wert des dritt-schlechtesten empfangenen Beacons abweicht. Die Formel (7.7) zeigt die Logik zur Sortierung der Beacons. Dabei ist Beacon b_1 genau dann geeigneter zur Posi-

tionsbestimmung als Beacon b_2 , wenn dessen mittlerer RSSI-Wert $rssi_1$ größer ist als $rssi_2$. Der hier angegebene Prozentsatz von 15 % beruht auf Messungen im gegebenen Testumfeld (Aufenthaltsraum). Für den Einsatz im Warenlager müsste dieser individuell angepasst werden.

$$b_1 > b_2 \Leftrightarrow rssi_1 > rssi_2 \quad (7.7)$$

Der Filter 'reliable' geht einen Schritt weiter und berücksichtigt bei der Entscheidung neben den RSSI-Werten ($rssi$) ebenfalls die Anzahl der empfangenen Advertising-Pakete (m). Diesen Ansatz wählen in einer ähnlichen Form auch die Autoren Qiu et al. [QZX⁺12]. Somit ist hierbei neben der Qualität des Signals auch die Quantität von Bedeutung. Hierdurch wird einerseits vermieden, dass ein Beacon gleichrangig eingestuft wird, obwohl von diesem weniger Pakete empfangen wurden. Andererseits fließen keine Beacons in die Positionsbestimmung ein, von denen zwar kurzfristig eine gute Signalstärke gemessen werden konnte, jedoch dann das Signal abreißt. Da zur Sortierung der Beacons (b) in diesem Fall zwei Größen Einfluss nehmen, wird zunächst die Hilfsfunktion ρ definiert (vgl. (7.9)).

$$b = (rssi, m) \quad (7.8)$$

$$\rho(rssi_1, rssi_2) = \begin{cases} 1, & |rssi_1 - rssi_2| < 5 \\ 0, & |rssi_1 - rssi_2| \geq 5 \end{cases} \quad (7.9)$$

Sie entscheidet darüber, ob zwei Signalstärken identisch sind ($\rho(rssi_1, rssi_2) = 1$) oder sich unterscheiden ($\rho(rssi_1, rssi_2) = 0$). Auf Grund der erfahrenen Signalstreuung werden die mittleren Signalstärken $rssi_1$ und $rssi_2$ als gleichwertig gesehen, solange ihre Differenz weniger als 5 dBm beträgt. Anschließend wird mittels der in Formel (7.10) gezeigten Logik darüber entschieden, ob b_1 vor b_2 einzuordnen ist oder nicht.

$$b_1 > b_2 \Leftrightarrow \rho(rssi_1, rssi_2) = 0 \text{ und } rssi_1 > rssi_2 \\ \text{oder } \rho(rssi_1, rssi_2) = 1 \text{ und } m_1 > m_2 \quad (7.10)$$

Dabei ist b_1 genau dann größer als b_2 , wenn sich die mittleren Signalstärken mindestens 5dBm von einander unterscheiden und $rssi_1$ größer ist als $rssi_2$ oder wenn die mittleren RSSI-Werte laut Definition der Funktion ρ identisch sind (weniger als 5dBm von einander abweichen) und die Anzahl der von Beacon b_1 empfangenen Advertising-Pakete (m_1) größer ist als die von b_2 . Wie schon beim Filter 'strong', werden für die Berechnung mindestens die ersten drei Beacons der sortierten Liste verwendet. Weitere werden unter den folgenden Kriterien aufgenommen. Einerseits darf die mittlere Signalstärke nicht mehr als 15 % vom drittplatzierten Beacon abweichen, andererseits dürfen von diesem Beacon maximal zwei Advertising-Pakete weniger als vom dritten Beacon der Liste empfangen worden sein. Zusätzlich ist es erforderlich mindestens 60 % der Advertising-Pakete erhalten zu haben. Auch hier gilt, dass die beschriebene Grenze von 15 % an die Gegebenheiten des Einsatzszenarios angepasst werden müssen.

Haben sich durch die zuvor gezeigte Filterung mehr als drei Beacons für die Berechnung der Positionsschätzung qualifiziert oder kommt bei mehr als drei Beacons kein Filter zur Anwendung, so stellt sich die Frage nach der Berechnungsart. Einerseits können die Werte in die in Abschnitt 7.1 gezeigt Formel (7.5) eingesetzt werden und mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate die Position geschätzt werden (Multilateration). Eine zweite Möglichkeit ergibt sich daraus, alle möglichen Dreierkombinationen der n qualifizierten Beacons (Grundgesamtheit) zu ermitteln und mit jeder Kombination eine Trilateration durchzuführen. [QZX⁺12] Da die Reihenfolge der Beacons in der Kombination keine Rolle spielt und ein Beacon nicht mehrfach in einer Kombination vorkommen kann bzw. darf, lässt sich die Anzahl der möglichen Kombinationen mithilfe des Binomialkoeffizienten darstellen (vgl. Formel (7.11)). [Bew11, S. 29 f.]

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! * k!} \quad (7.11)$$

Über die daraus resultierenden $\binom{n}{3}$ Positionsschätzungen wird anschließend gemittelt, indem aus den Koordinaten x und y der arithmetische Mittelwert gebildet wird.

7.3 Umsetzung für iOS

Nachfolgend wird die Umsetzung des Systems für iOS beschrieben. Die Grundlage bildet die Kenntnis über die Attribute der zur Verfügung stehenden Beacons, wie zum Beispiel die Position im Raum, die ID sowie die durch die Kalibrierung ermittelten Eigenschaften Path-Loss Exponent n , $RSSI_0$, d_0 und die gemessene Standardabweichung Xg . Wie Listing 7.1 zeigt, werden diese in einer für iOS typischen XML-Struktur, der Property List, abgebildet. Dabei werden die Beacons als Dictionary angelegt, um beim Laden der Daten komfortabel über die Schlüssel auf deren Werte zugreifen zu können.

```

1 <plist version="1.0">
2 <dict>
3   <key>beacons </key>
4   <array>
5     <dict>
6       <key>xg</key>
7       <integer>0</integer>
8       <key>rssiValues </key>
9       <array />
10      <key>rssiAvg </key>
11      <integer>0</integer>
12      <key>n</key>
13      <integer>2</integer>
14      <key>x</key>
15      <integer>4</integer>
16      <key>y</key>
17      <real>8.3</real>
18      <key>rssi0 </key>
19      <real>-49.91</real>
20      <key>d0 </key>
21      <integer>1</integer>
22      <key>minorId </key>
23      <integer>1</integer>
24    </dict>

```

```

25     ...
26     </array>
27 </dict>
28 </plist>

```

Listing 7.1: Abbildung der Beacons als Property List.

Des Weiteren werden für die Messung der Measured Power (der gemessenen Signalstärke am Abstand von 1 m, $rssi_0$), die Punktkalibrierung und die Positionsschätzung die in Abbildung 7.1 dargestellten ViewController entwickelt. Der Vollständigkeit halber, auch wenn das Core Location Framework bereits für die weitere Verwendung durch Kapitel 6 ausgeschlossen wurde, besteht in allen drei Anwendungsfällen die Möglichkeit zwischen Estimote SDK (Discovering) und Core Location Framework (Ranging) zu wählen. Während beim Ermitteln von $RSSI_0$ lediglich die Minor-ID des Beacons angegeben muss, ist bei der Punktkalibrierung die Eingabe des Kalibrierungspunktes (x - und y -Koordinaten) sowie eines maximalen Standardfehlers (SEM³) nötig. Dieser Fehler ist ein statistisches Maß dafür, wie hoch die Genauigkeit des aus der Stichprobe ermittelten Mittelwertes ist. [Kos08] Statt einer fest vorgegebenen Anzahl von Messwerten für die Kalibrierung zu verwenden, wird mindestens eine Stichprobengröße von 75 Werten herangezogen, hiervon der Standardfehler berechnet und anschließend mit dem eingegebenen verglichen. Ist der berechnete Fehler größer, werden weitere Messungen durchgeführt bis die Stichprobe der gewünschten Genauigkeit entspricht. Nach Abschluss der Punktkalibrierung werden die errechneten Werte in der Property List gespeichert und für das in der pickerView gewählte Beacon angezeigt. D

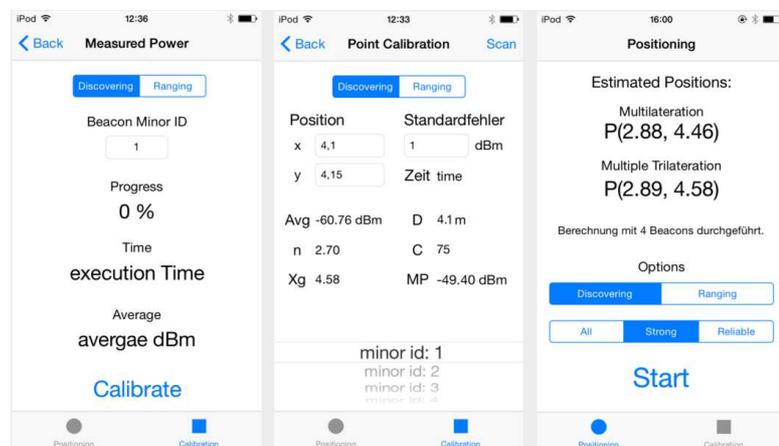


Abbildung 7.1: ViewController zum Messen der Signalstärke am Abstand von 1 m ($RSSI_0$ /Measured Power), zum Durchführen der Punktkalibrierung und der Schätzung der aktuellen Position.

bezeichnet dabei den realen Abstand zwischen dem Kalibrierungspunkt und dem gewählten Beacon, C ist die Anzahl der für die Berechnung herangezogenen RSSI-Werte. Die rechte der drei Views (PositioningViewController) zeigt die Oberfläche zur Schätzung der

³Standard Error of the Mean.

Position. Dieser Controller zeichnet die RSSI-Werte der umgebenen Beacons auf und filtert zugleich die in Kapitel 6 identifizierten Fehlmessungen. Bei mehr als drei zur Verfügung gestellten Beacons kann hier eine der drei beschriebenen Filtermethoden ausgewählt werden, die nach der Messung der Signalstärken auf die Beacons angewendet werden.

Der Trilaterator ist eine von zwei Hauptklassen der Math-Gruppe im Xcode-Projekt. Er nimmt die vom `PositioningViewController` übergebenen Beacon-Objekte entgegen und schätzt zunächst mithilfe der zweiten Hauptklasse `LogDistancePathLossModel` die benötigten Abstände zwischen aktueller Position und den Beacons. Anschließend werden die Matrix A und die Vektoren \vec{x} und \vec{b} der Formel (7.6) mit den entsprechenden Werten besetzt. Zur Lösung des LGS kommt das Accelerate Framework für iOS zum Einsatz, das durch die Bereitstellung der `vecLib` Reference eine Schnittstelle zu Apples Implementierung von LAPACK⁴ bereitstellt. Die Funktion `dge1s` des LAPACKs ist in der Lage lineare Gleichungssysteme mit der Methode der kleinsten Quadrate zu lösen. Dabei werden auch überbestimmte Gleichungssysteme, das heißt solche, die mehr Gleichungen als Unbekannte besitzen, berücksichtigt. Dies ist genau dann der Fall, wenn mehr als drei Beacons zum Einsatz kommen und das Multilaterations-Verfahren Anwendung findet. Neben den beschriebenen Hauptklassen existieren in der Math-Gruppe zusätzlich zwei Hilfsklassen. `VISPosition` dient zur Beschreibung von zweidimensionalen Koordinaten, `VISMath` hingegen stellt Funktionen zur Berechnung der Euklidischen Distanz zwischen zwei `VISPosition`-Objekten, des Medians und Standardabweichung eines mit RSSI-Werten befülltes `NSArray` zur Verfügung. Zusätzlich existiert die in Listing (D.1) aufgeführte Funktion, die alle $\binom{n}{3}$ Kombinationen als `NSArray` zurückgibt. Tabelle 7.3 zeigt die beschriebenen Klassen der Math-Gruppe im Überblick:

Klasse	Funktion
Trilaterator	Positionsschätzung mittels <code>dge1s</code> -Funktion
<code>LogDistancePathLossModel</code>	Schätzt den Exponenten n und den Abstand zwischen Beacon und Empfänger
<code>VISPosition</code>	Klasse zum Abbilden einer Position in der Ebene (2D)
<code>VISMath</code>	Klasse zum Berechnen der Euklidischen Distanz zwischen zwei <code>VISPositions</code> , der Standardabweichung, des Standardfehlers, des Medians und zur Ermittlung der $\binom{n}{3}$ Kombinationen

Tabelle 7.3: Positionierungsklassen und ihre Funktionen im Indoor-Positionierungsystems.

⁴Linear Algebra Package, <http://netlib.org/lapack>.

7.4 Evaluation

Dieser Abschnitt beschreibt die Durchführung der Evaluation sowie die Positionierungsergebnisse unter Anwendung der in Kapitel 7.2 aufgeführten Testparameter.

Als Umgebung dient abermals der Aufenthaltsraum der Firma *VIISON* (vgl. Abschnitt 5.2.1). Hierzu werden insgesamt 5 Messpunkte (M1 - M5) im Raum definiert, die in Abbildung 7.2 dargestellt werden. Die Messung in der Mitte wird in Ausrichtung der vier Wände (W1 - W4) durchgeführt, die Ausrichtung an den äußeren Messpunkten (M2 - M5) ist stets in Richtung Raummitte. Pro Kombination aus den genannten Parametern Beaconanzahl, Sendeleistung, Beacon-Filter und Berechnungsart werden insgesamt fünf Messungen pro Messpunkt und Ausrichtung durchgeführt⁵, um im Nachhinein den mittleren Fehler an den Positionen bestimmen zu können. Eine Ausnahme bilden die Messungen unter Zuhilfenahme von 3 Beacons. Da in diesem Fall kein Unterschied zwischen den Berechnungsarten und den einzelnen Filtern bzw. kein Filter bestehen kann, werden für diese Kombinationen keine Messungen durchgeführt. Die Dauer einer Messung wird auf zwei Sekunden begrenzt, um einem Navigationsszenario näher zu kommen. Das Advertising-Intervall ist auf 200 ms einge-

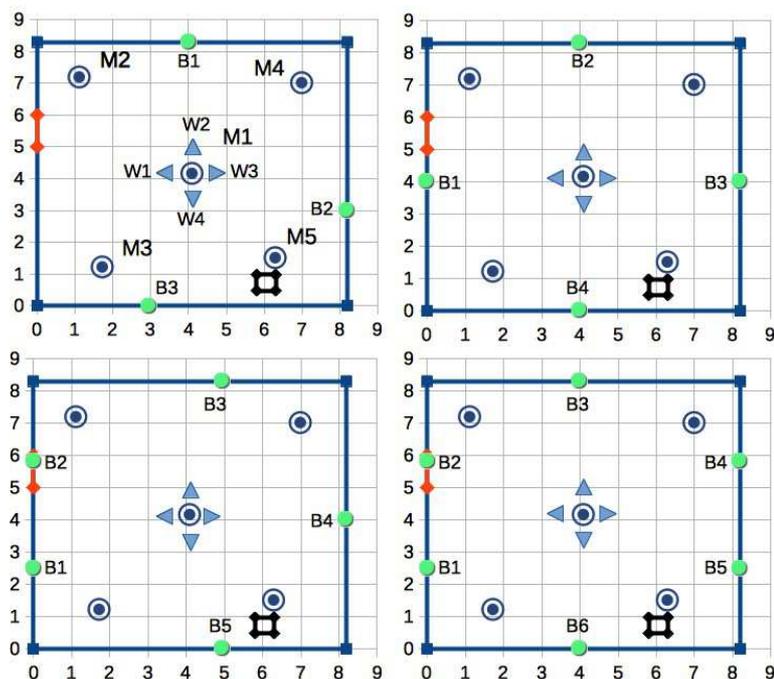


Abbildung 7.2: Versuchsaufbau im Aufenthaltsraum.

stellt, wodurch eine maximale Anzahl von 10 Advertising-Paketen pro Messung empfangen werden kann. Stehen ausschließlich drei Beacons zur Verfügung, werden diese, soweit es die Raummaße zulassen, in einem annähernd gleichseitigen Dreieck angeordnet. Die Autoren Han et al. zeigen in ihrer Publikation [HCL09], dass hierdurch die Genauigkeit der Positi-

⁵Hieraus ergeben sich in der Summe 800 Einzelmessungen.

onsschätzung erhöht werden kann. Die Platzierungen für die Beaconanzahl vier, fünf und sechs wird so gewählt, dass eine möglichst gleichmäßige Funkabdeckung im Raum besteht. Die Durchführung der Kalibrierung findet an der Position K(4,1 | 4,15) mit Ausrichtung W3 statt.

Nach Beschreibung des Versuchsaufbaus und der -durchführung werden nachfolgend Kategorien definiert, um die erhaltenen Positionsschätzungen anhand ihres mittleren Fehlers bewerten zu können. Hierzu wird das in Kapitel 4 eingeführte Lagermodell herangezogen. Wie in Tabelle 7.4 zu sehen ist, wird ein Fehler von 0,0 m bis 1,0 m mit „sehr gut“ bewertet, da hiermit eine Positionsschätzung in Lagerplatzgenauigkeit gegeben ist. Werden die Schätzungen mit einem Fehler von 1,5 m bis 2,0 m möglich, könnte hiermit angegeben werden, ob sich der Kommissionierer in unmittelbarer Nähe des anzulaufenden Lagerplatzes befindet. Die Kategorie „befriedigend“ gibt an, ob mit den in dieser Spanne liegenden Positionsschätzungen zumindest noch eine Aussage darüber getroffen werden kann, ob sich der Lagerplatz in der Nähe des aktuellen Standorts befindet. Als noch „ausreichend“ werden Schätzungen bezeichnet, die einen maximalen Fehler von einer viertel Ganglänge besitzen. Alle anderen, ab einem Fehlerwert von 2,5 m, werden als „ungenügend“ deklariert und reichen demnach für das in dieser Arbeit beschriebene Beispiellager und Szenario nicht aus. Wie bereits angesprochen, werden diese Kategorien dazu verwendet, die im folgenden Abschnitt beschriebenen Ergebnisse einordnen zu können.

Kategorie	Fehler i. D.
sehr gut	0,0 m bis 1,0 m
gut	1,0 m bis 1,5 m
befriedigend	1,5 m bis 2,0 m
ausreichend	2,0 m bis 2,5 m
ungenügend	ab 2,5 m

Tabelle 7.4: Kategorien zur Bewertung der Positionsschätzungen.

7.4.1 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse wird zur besseren Übersicht zunächst in Randpositionen, die sich aus den Messpunkten M2 bis M5 ergeben, und der Mitte (M1 inkl. der vier Ausrichtungen W1 bis W4) logisch gruppiert. Zudem werden die Kombinationen der Parameter aufsteigend nach ihrem mittleren Fehler sortiert, der sich, wie bereits bei der Evaluation des *Estimote* Indoor Location SDKs, durch die Berechnung des arithmetischen Mittels der Fehler der Einzelmessungen ergibt. Auch hier ist dieser Fehler als Güte der Genauigkeit zu betrachten. Die komplette Liste der Ergebnisdarstellung inklusive Bewertungskategorien kann in Anhang D.1 eingesehen werden. Hierbei ist zu erkennen, dass die Positionsschätzungen mit

der höchsten Genauigkeit in der Mitte gemessen werden. Die niedrigste Genauigkeit mit einem mittleren Fehler von ab 11,0 m Metern wird mit einer Beaconanzahl kleiner sechs, einer Sendeleistung von +4 dBm und keinem Filter beobachtet. Hierbei sind alle Positionsgruppen (Mitte, Rand) vertreten. Im Folgenden werden einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Die Tabelle 7.5 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnismenge und stellt die 14 Kombinationen mit dem niedrigsten mittleren Fehler dar, der von 0,3 m bis 1,0 m reicht und demnach der Kategorie „sehr gut“ zuzuordnen sind. Alle in dieser Tabelle dargestellten Parameterkombination erreichen ihre aufgeführte Genauigkeit an den vier Ausrichtungen in der Mitte des Raumes (M1). Der niedrigste mittlere Fehler liegt bei 0,3 m und wird mit 3 Beacons und einer Sendeleistung von -8 dBm erreicht. Das nächst bessere Ergebnis von 0,7 m wird von

Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Fehler i. D. (m)
3	-8	Kein	Mitte	-	0,3
6	+4	Strong	Mitte	Multilateration	0,7
4	-8	Strong	Mitte	Multilateration	0,7
4	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
6	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	0,7
6	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
6	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
5	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,8
5	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	0,8
5	-8	Kein	Mitte	Multilateration	0,9
6	+4	Kein	Mitte	Multilateration	0,9
5	-8	Strong	Mitte	Multilateration	0,9
5	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,0
5	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	1,0

Tabelle 7.5: Die besten 14 Kombinationen der Testparameter aufsteigend sortiert nach dem mittleren Fehler. Sie bilden die Kategorie „sehr gut“.

sechs Kombinationen erreicht. Darunter können vier mal sechs Beacons mit der Sendeleistung +4 dBm und einem Filter beobachtet werden. Zudem tritt diese Genauigkeit zwei mal mit 4 Beacons, einer Sendeleistung von -8 dBm und dem Filter 'strong' auf. Ein Fehler von 0,8 m kann mit fünf Beacons, einer Sendeleistung von -8 dBm, der Berechnungsart Multiple Trilateration und unter Zuhilfenahme des Filters 'strong' oder keinem Filter erlangt werden. Bei einer Beaconanzahl von fünf Beacons, einer Sendeleistung von -8 dBm, der Berechnungsart Multilateration und bei Verwendung des Filters 'strong' oder keinem Beacon-Filter kommt es zu einem mittleren Fehler von 0,9 m. Aber auch beim Einsatz von sechs Beacons, der Sendeleistung +4 dBm, keinem Filter und der Berechnungsart Multilateration ist der mittlere Fehler an den Messungen in der Mitte des Raumes 0,9 m.

Die Parameterkombinationen, welche eine Genauigkeit der Kategorie „gut“ erreichen, können in Tabelle 7.6 eingesehen werden. Es zeigt sich, dass die Anforderungen dieser zweiten Kategorie ebenfalls ausschließlich an Positionen in der Mitte des Raumes erfüllt werden. Darüber hinaus sind einzig Kombinationen vertreten, die eine Beaconanzahl von vier oder sechs aufweisen. Der in dieser Kategorie niedrigste mittlere Fehler von 1,1 m wird mit 6 Beacons, einer Sendeleistung von +4 dBm, keinem Filter und der Berechnungsart Multiple Trilateration erreicht. Eine geringfügig niedrigere Genauigkeit von 1,2 m erlangt die Kombination von sechs Beacons, einer Sendeleistung von -8 dBm, dem Filter 'strong' und der Berechnungsart Multilateration. Mit vier zur Verfügung gestellten Beacons, der

Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Fehler i. D. (m)
6	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	1,1
6	-8	Strong	Mitte	Multilateration	1,2
4	+4	Strong	Mitte	Multilateration	1,3
4	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4
6	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4
6	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,5

Tabelle 7.6: Kombination der Parameter, deren mittlerer Fehler in die Kategorie „gut“ einzuordnen ist.

Sendeleistung +4 dBm und dem Filter 'strong' ergibt sich unter Anwendung der Multilateration ein mittlerer Fehler von 1,3 m und mittels Multiple Trilateration ein mittlerer Fehler von 1,4 m. Werden lediglich die Beaconanzahl auf sechs und die eingestellte Sendeleistung auf -8 dBm geändert, kann ein identischer Fehler von 1,4 m beobachtet werden. Die letzte

Kombination, bei der zur vorherigen allein der Filter von 'reliable' auf 'strong' angepasst wird, erreicht einen etwas geringeren Fehler von 1,5 m.

Ein Auszug der Randpositionen wird durch Tabelle 7.7 dargestellt. Diese zeigt, dass an diesen Positionen im Mittel eine maximale Genauigkeit von 3,1 m beim Einsatz von sechs Beacons, einer Sendeleistung von -8 dBm, einer der Filter 'reliable' oder 'strong' und der Berechnungsart Multilateration erreicht wird. Wird lediglich die Berechnungsart auf Multiple Trilateration geändert und die anderen Parameter bleiben konstant, so kann ein mittlerer Fehler von 3,4 m beobachtet werden. Die gleiche Genauigkeit kann mit einer Beaconanzahl von fünf Beacons unter Einsatz der Sendeleistung -8 dBm unter Anwendung des Filters 'strong' und der Berechnungsart Multilateration oder keinem Filter und der Multiplen Trilateration erreicht werden. Auf Grund der genannten Genauigkeiten können die Randpositionen, die im Szenario des Aufenthaltsraumes gemessen wurden, nicht der Kategorie „ausreichend“ zugeordnet sondern müssen bereits in die Kategorie „ungenügend“ eingeordnet werden.

Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Fehler i. D. (m)
6	-8	Reliable	Rand	Multilateration	3,1
6	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,1
6	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,4
6	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	3,4
5	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,4
5	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,4

Tabelle 7.7: Kombinationen der Testparameter, die an den Randpositionen den geringsten Fehler verursachen.

7.4.2 Auswertung und Interpretation

Die Ergebnisse der Kombinationen aus den gegebenen Testparametern haben gezeigt, dass die geforderten mittleren Fehler der Kategorien „sehr gut“, „gut“ und „befriedigend“ einzig durch die Positionen in der Mitte erfüllt werden. Demnach ist es mit keiner Kombination möglich an den Randpositionen eine im Mittel „befriedigende“ Positionsschätzung zu erhalten. Diese können lediglich in die Kategorie „ungenügend“ eingeordnet werden. Das beste Ergebnis an den Randpositionen ergibt sich aus der Kombination von sechs Beacons, der Sendeleistung -8 dBm, dem Filter 'strong' oder 'reliable' und der Berechnungsart Multilateration. Der Grund für die Unterschiede in der Genauigkeit kann darin gesehen werden,

dass die Randpositionen in einem großen Abstand von 3,44 m bis 4,24 m zum gewählten Kalibrierungspunkt liegen. Die Kalibrierung des Verlustmodells stimmt hier nur noch in Ansätzen mit dem tatsächlichen Pfadverlust überein. Neben der Entfernung scheint jedoch ein größeres Problem zu sein, dass die Reflektion der Wellen in den Ecken des Raumes zu anderen Signalstärken führen als in der Mitte des Raumes und hierdurch andere Gegebenheiten hervorrufen. Bei einer Navigation in der Lagerverwaltung sind die hier aufgeführten Ergebnisse in der Mitte jedoch von größerer Bedeutung als die extremen Randpositionen des Aufenthaltsraumes, der eine annähernd quadratische Fläche von ca. 68 m^2 misst. Einerseits existieren in einem geraden Lagergang keine rechtwinkligen Wände, andererseits könnte der Gang zwischen zwei Lagerregalen, der ca. 2 m breit und 10 m lang ist, in der Länge in zwei virtuelle Unterräume mit je einem Kalibrierungspunkt unterteilt werden, wodurch der Abstand des Kommissionierers zum Kalibrierungspunkt stark verkürzt werden kann. Ist eine hohe Genauigkeit der Positionsschätzung auch in Randpositionen erforderlich, könnte die zuvor ausgeschlossene Punktkalibrierung basierend auf 'Proximity' eingesetzt werden. Wie bereits erwähnt erfordert diese jedoch einen weitaus höheren Kalibrierungsaufwand.

Die höchste Genauigkeit von 0,3 m wird in der Mitte unter Zuhilfenahme von drei Beacons und einer Sendeleistung von -8 dBm gemessen. Die sehr hohe Genauigkeit kann damit erklärt werden, dass die zur Verfügung stehenden Beacons ein annähernd gleichseitiges Dreieck aufspannen. Nach den Autoren Han et al. entsteht hierdurch eine optimale Konfiguration, die den Fehler in der Positionsschätzung minimieren kann. [HCL09] Dies kann anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. An den Randpositionen hingegen kann diese Kombination aus Beaconanzahl und Sendeleistung eine lediglich um 0,5 m bis 0,7 m geringere Genauigkeiten erreichen als mit sechs Beacons und einem Filter. Die Gründe liegen hier sehr wahrscheinlich an den zu großen Distanzen zwischen Messpunkt und Referenzbeacons. Als Beispiel sei an dieser Stelle Messpunkt M3 aufgeführt (vgl. Abbildung 7.2). Die Entfernung zwischen diesem Messpunkt und Beacon B1 beträgt 7,45 m und zu Beacon B2 6,71 m. Damit ist lediglich zu Beacon B3 mit einer Distanz von 1,73 m ein geringer Abstand gegeben. Diese Annahme kann mit den Ergebnissen des in Kapitel 5 evaluierten Indoor Location SDKs gestützt werden. In dem kleineren Raum (Küche) ergeben sich Positionsschätzungen von höherer Genauigkeit als im Aufenthaltsraum. Weiter betonen die Autoren Qiu et al., dass RSSI-Werte nicht robust sind, wenn sich Sender und Empfänger weit von einander entfernt sind. Dies wiederum resultiert in ungenauen Abstandsschätzungen. [QZX⁺12] Trotz der hohen Genauigkeit in der Mitte des Raumes ist der Einsatz der minimalen Anzahl von Referenzbeacons zur Durchführung der Positionsbestimmung im Warenlager kritisch zu betrachten. Zum einen ist zwar eine wichtige Eigenschaft der BLE-Technologie, dass sie energieeffizient ist und Hardware wie *iBeacons*, die auf dieser Technologie aufbauen, mit langen Laufzeiten überzeugen können. Allerdings ist auch die Entladung der Knopfzellen an einem bestimmten Zeitpunkt eingetreten. Geschieht dies zunächst unbemerkt, stehen nicht genügend Beacons zur Positionsbestimmung zur Verfügung und das System kann seinen wirtschaftlichen Vorteil der Zeit- und Kostenersparnis nicht ausschöpfen. Ähnliche Probleme können auftreten, wenn zu einem der Beacons kein oder nur sehr schlechter Empfang besteht. Hierzu wurde in Kapitel 6 gezeigt, wie groß die Unterschiede in der empfangenen Signalstärke zwischen frontaler (LOS) und abgewendeter Ausrichtung (NLOS) zum Beacon

sind. Zudem dürfen technische Defekte an der Hardware nicht außer Acht gelassen werden.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass sich auch ohne den Einsatz eines Filters und dem Einsatz von fünf oder sechs Beacons „gute“ bis „sehr gute“ Positionsschätzungen ergeben können. Um jedoch die Effizienz der Filter zu bewerten, muss eine Gegenüberstellung der mittleren Fehler sortiert nach Beaconanzahl, Sendeleistung, Position und Berechnungsart stattfinden. In der in Anhang D.5 und D.6 gezeigten, so sortierten Aufstellung ist zu sehen, dass bei vier Beacons und unter der Anwendung des Filters 'strong' stets Schätzungen mit einem geringeren mittleren Fehler erreicht werden als ohne Filter. Sowohl in der Mitte des Raumes aber vor allem auch an den Randpositionen unterscheiden sich die mittleren Fehler deutlich. Der Filter 'reliable' kann lediglich bei einer Sendeleistung von +4 dBm an den Randpositionen bessere Schätzungen erreichen als mit dem Filter 'strong' oder keinem Filter. Ansonsten werden unter seinem Einsatz ähnliche Genauigkeiten erreicht, mit Ausnahme der Randpositionen bei einer Sendeleistung von -8 dBm. Hier ist der mittlere Fehler sogar um einen Meter größer als ohne Filter.

Bei einer Anzahl von fünf Beacons und der Sendeleistung -8 dBm zeigen beide Filter sowohl in der Mitte als auch am Rand sehr geringe Abweichungen zu den mittleren Fehlern, die ohne Filter gemessen werden. Lediglich bei einer Sendeleistung von +4 dBm werden mit Filtern deutlich höhere Genauigkeiten als ohne Filter gemessen. Der Filter 'reliable' erreicht hierbei in der Raummitte einen ca. 2 m geringeren mittleren Fehler als der Filter 'strong'.

Die Ergebnisse bei sechs Beacons zeigen beim Vergleich der Filtermethoden eine ähnliche Aufstellung. Unter Einsatz der Filter und der Sendeleistung -8 dBm kann ein stets geringerer mittlerer Fehler in der Positionsschätzung erreicht werden als ohne Filter. Genauso, wenn auch mit einer geringeren Differenz, fallen die Unterschiede im mittleren Fehler bei der Sendeleistung +4 dBm und den Positionen in der Raummitte aus. Lediglich an den Randpositionen und der gleichen Sendeleistung von +4 dBm werden ohne Filter annähernd gleiche oder geringfügig höhere Genauigkeiten erreicht.

Es bleibt zu sagen, dass mit Ausnahme der zuletzt genannten Kombination aus sechs Beacons, der Sendeleistung von +4 dBm und den Randpositionen durch den Einsatz eines Filter keine Nachteile entstehen, sondern häufig zu höheren Genauigkeiten in der Positionsschätzung führt. Dies wird erreicht, indem weit entfernte Beacons anhand ihrer niedrigeren RSSI-Werte gefiltert werden und überwiegend nahegelegene Beacons in die Berechnung einfließen. Ein Grund, warum dies nicht ausnahmslos der Fall ist, liegt in der Justierung der Filter, die auf Grund der Signalfuktuation schwierig ist. Bei dem vorliegenden Setup könnte der Schwellwert zur Filterung etwas zu hoch gewählt sein, wodurch zu weit entfernte Beacons teilweise mit in die Berechnung aufgenommen werden und einen höheren Fehler verursachen. Trotzdem kann auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse der Einsatz eines Filters empfohlen werden. Welche Filter im Rahmen des Lagers einzusetzen ist, bleibt zu prüfen. Dies kommt auf die zur Verfügung stehende Beaconanzahl und eingestellte Sendeleistung an.

Zum Parameter Sendeleistung ist zu sagen, dass vor allem in der Mitte kein direkter Unterschied in der erzielten Genauigkeit zu beobachten ist. Die Genauigkeiten der Kategorien „sehr gut“ bis „ausreichend“ werden sowohl von Kombinationen mit +4 dBm (50 %) als auch von solchen mit einer Sendeleistung von -8 dBm (50 %) erreicht. An den

Randpositionen lässt sich lediglich die Aussage treffen, dass hier die geringsten Fehler mit der Sendeleistung -8 dBm erzielt werden. Hingegen werden die Positionsschätzungen mit der niedrigsten Genauigkeit (ab 11 m) mittels der Sendeleistung $+4\text{ dBm}$ gemessen. Dies lässt erneut die Vermutung aufkommen, dass es an den Randpositionen in den Ecken des Raumes besonders unter dem Einsatz einer höheren Signalstärke zu Reflexionen kommen kann, die sich negativ auf die Positionsschätzungen auswirken. Dies könnte für den Einsatz im Warenlager zur Folge haben, dass der Einsatz von einer niedrigeren Sendeleistung wie -8 dBm auf Grund des geringen Abstandes zwischen den Regalen (Gangbreite) von Vorteil ist.

Bei den Berechnungsarten kann sich keine der zwei als eine mit stetig geringeren Fehlern behaupten. Im Normalfall ergibt sich ein maximaler Unterschied zwischen $0,1\text{ m}$ bis $0,3\text{ m}$ im mittleren Fehler. Eine Ausnahme bildet die Differenz von $1,6\text{ m}$ zwischen den zwei Berechnungsarten bei einer Sendeleistung von $+4\text{ dBm}$ und dem Filter 'reliable' an den Randpositionen. Nichtsdestotrotz hat die Berechnungsart Multiple Trilateration den Vorteil, dass sie weiteren Filtern unterzogen werden kann. Beispielsweise kann dadurch, dass die Ergebnisse der einzelnen Trilaterationen vorliegen, solche Positionsschätzungen vor dem Bilden des arithmetischen Mittels ausgeschlossen werden, die eine zu große Distanz von den übrigen Schätzungen aufweisen. Hierdurch können auf der Ebene der Positionsschätzungen Ausreißer eliminiert und die Genauigkeit weiter erhöht werden. [QZX⁺12]

In der Gesamtheit bedeuten die zuvor erläuterten Umstände, dass sich keine Kombination der getesteten Parameter in vollem Umfang hinsichtlich der Genauigkeit bewähren kann. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Kombination aus drei Beacons und einer Sendeleistung von -8 dBm erwähnt, die im Zentrum des Raumes den geringsten Fehler, an den Randpositionen jedoch im Mittel um $0,5\text{ m}$ geringere Genauigkeiten als andere Kombinationen hervorbringen kann. Bei der Entscheidung über die Wahl der Parameter muss stets der dahinterliegende Anwendungsfall bedacht und berücksichtigt werden. Für den hier vorliegenden Einsatz der *iBeacon*-Technologie in der Lagerverwaltung ist zusammenfassend aufzuführen, dass die in der Raummitte gemessenen mittleren Fehler von größerer Bedeutung für die Beurteilung sind und die Abstandsschätzungen bei geringer Entfernung zum Beacon genauer erfolgen können. Aus diesem Grund wird eine Genauigkeit der Positionsschätzungen im Lagergang von mindestens $2,5\text{ m}$ angenommen, die damit der zuvor definierten Kategorie „ausreichend“ entspricht. Des Weiteren ist die Beaconanzahl für diesen Einsatzzweck auf mindestens vier festzulegen. Hierdurch kann einerseits die Ausfallsicherheit des Systems gewährleistet, andererseits NLOS-Situationen umgangen werden. Die Ergebnisse der Positionsschätzungen haben weiter gezeigt, dass der geforderte Einsatz eines Filters keinen höheren Fehler verursacht, sondern diesen überwiegend reduzieren kann und somit für die Unterscheidung, welche Beacons zur Schätzung herangezogen werden, einzusetzen ist. Ferner ist die Anordnung der Beacons wichtig und möglichst in gleichseitigen Dreiecken vorzunehmen. Hinsichtlich der beiden Sendeleistungen $+4\text{ dBm}$ und -8 dBm , die sich aus Kapitel 6 ergeben haben, ist eine letztendliche Entscheidung in einem realen Lagerszenario zu treffen. Es besteht jedoch die Vermutung, dass eine geringere Sendeleistung bedingt durch die schmalen Gänge Reflexionen abschwächen und hierdurch den Fehler minimieren könnte. Bei der Wahl der Berechnungsart haben sich zwar im Mittel keine direkten Unterschiede ergeben, auf Grund der Erweiterbarkeit

der Multiplen Trilateration um einen weiteren Filter für Ausreißer in der Positionsschätzung, ist dieser der Multilateration vorzuziehen.

7.5 Zwischenfazit Indoor-Positionierungssystem

Kapitel 7.1 hat gezeigt, welche Schritte und Überlegungen notwendig sind, bevor eine Positionsschätzung auf der Grundlage von empfangenen Signalstärken stattfinden kann. Hierzu wird zunächst beschrieben, wie das bereits eingeführte Log-Distance Path-Loss Model mithilfe der Punktkalibrierung zu konfigurieren ist. Daraufhin wird der mittlere quadratische Fehler eingeführt (MSE), der zur Bestimmung des bestmöglichen Path-Loss Exponenten n eingesetzt wird. Zur Lösung der Trilateration wird zunächst ein „Linearisierungs-Tool“ eingesetzt, um das Gleichungssystem zu linearisieren und somit leichter lösen zu können. Da in der Praxis jedoch nur Abstandsschätzungen und keine genauen Messungen mittels RSSI-Werten stattfinden kann, muss zusätzlich zur Lösung des erzeugten LGS eine Ausgleichsrechnung stattfinden. Diese wird mit der linearen Variante der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

Ferner werden die vier Testparameter Beaconanzahl, Sendeleistung, Filter und Berechnungsart definiert, um zu prüfen, wie sich diese auf die Genauigkeit der Positionsschätzung (auch als Fehler im Sinne von Abweichung zur tatsächlichen Position bezeichnet) auswirken. Die beschriebenen Voraussetzungen zum Kalibrieren des Verlustmodells und der Durchführung der (Tri-)Lateration sowie die aufgeführten Testparameter werden in einer Anwendung für das Betriebssystem iOS umgesetzt. Abschließend bleibt zu sagen, dass sich keine bestimmte Kombination absolut behaupten kann, sondern bei den hier vorliegenden Testergebnissen pro Anwendungsfall zu entscheiden ist. Für den Einsatz in der Lagerverwaltung kann jedoch festgehalten werden, dass

- die vorliegenden Ergebnisse in der Mitte von größerer Bedeutung sind und aus diesem Grund davon ausgegangen werden kann, dass zumindest eine Genauigkeit von 2,5 m (ein Viertel der Ganglänge) erreicht werden kann,
- der Abstand zum Kalibrierungspunkt nicht zu groß werden darf, wenn sich hierdurch die äußeren Umstände ändern,
- die Beaconanzahl pro Abschnitt größer als drei zu wählen ist, um Ausfallsicherheit gewährleisten zu können und nicht auf Beacons angewiesen sein zu müssen, zu denen kein Sichtkontakt besteht,
- der Einsatz von Beacon-Filtern hinsichtlich der Positionierungsgenauigkeit überwiegend Vorteile bringt; welcher Filter im Umfeld des Lagers einzusetzen ist, bleibt jedoch zu prüfen,
- sich die Anordnung der Beacons auf die Genauigkeit der Positionsschätzung auswirkt und aus diesem Grund in annähernd gleichseitigen Dreiecken erfolgen muss,

- eine Entscheidung zwischen den Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm in einem realen Lagerszenario zu treffen ist. Der Einsatz von -8 dBm könnte jedoch den Mehrwegempfang reduzieren und somit zu geringeren Fehlern in der Positionsschätzung führen,
- der Einsatz der Multiplen Trilateration zu wählen ist, sofern diese mit einem weiteren Positionsschätzungsfilter erweitert wird.

Das folgende Kapitel erarbeitet theoretisch den Einsatz der *iBeacon*-Technologie für das genannte Navigationsszenario im Warenlager.

Kapitel 8

Einsatz im Warenlager

Dieses Kapitel dient der Beschreibung eines Konzepts, wie die *iBeacon*-Technologie auf Grundlage der in den vorangegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse in der Lagerverwaltung konkret einzusetzen sind. Hierzu werden zunächst die Anforderungen für eine Navigation im Warenlager aufgestellt und anschließend erläutert, wie diese anhand des in Kapitel 4 eingeführten Lagermodells umzusetzen sind. Abschließend wird darauf eingegangen, welche Anweisungen die Navigation in Schlüsselsituationen zu geben hat.

8.1 Anforderungen

Zur Beschreibung der Anforderungen, die an eine Indoor-Navigation im Szenario eines Warenlagers gestellt werden, dient das bereits eingeführte Modell eines Lagers. Hierbei muss nächst zwischen zwei Arten von Lagergängen unterschieden werden. Diese werden durch Abbildung 8.1 dargestellt. Einerseits existieren Gänge, die sich zwischen zwei Lagerregalen

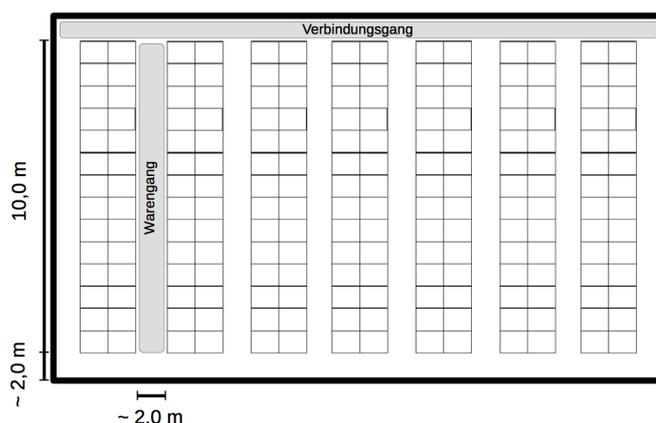


Abbildung 8.1: Warengänge befinden sich zwischen den Lagerregalen, Verbindungsgänge hingegen stellen die Verbindung zwischen den Warengängen her.

befinden und im Folgenden als *Warengänge* bezeichnet werden. Andererseits werden diese

Warengänge durch weitere Wege verbunden, welche als *Verbindungsgänge* zu bezeichnen sind. Durch die so definierte Unterscheidung, lassen sich pro Art verschiedene Anforderungen definieren. In Warengängen, in denen der Kommissionierer den korrekten Lagerplatz finden und die Ware abholen muss, ist eine möglichst hohe Genauigkeit gefordert, um genaue Instruktionen geben zu können, in welcher Entfernung sich die Ware befindet. In den Verbindungsgängen hingegen ist es für die Navigation hinreichend zu wissen, in welchen Warengang wann abzubiegen ist. Diese Situation ist mit dem Abbiegen im Straßenverkehr vergleichbar. Vorausgesetzt der Fahrer hat keine Kenntnis über das Straßennetz, reicht ihm eine Instruktion seitens des Beifahrers oder Navigationssystems aus, die ihn darüber informiert beispielsweise an der nächsten Kreuzung rechts abzubiegen. Aus diesem Grund ist in diesen Gängen lediglich eine grobe Positionsbestimmung erforderlich.

8.2 Konzept

Die zuvor beschriebenen Anforderungen können wie folgt umgesetzt werden. Zunächst gilt es in den Warengängen eine möglichst hohe Genauigkeit der Positionsschätzung herzustellen. Wie in Abbildung 8.2 zu sehen, wird hierzu jeder Warengang in zwei Zonen oder virtuelle Unterräume aufgeteilt, wodurch jede Zone ca. 2,0 m × 5,0 m misst. Pro Zone wird ein Kalibrierungspunkt in der Mitte der Zone angesetzt. Die Parameter des Verlustmodells der Beacons, die in dieser Zone angebracht werden, sind am zugehörigen Kalibrierungspunkt zu ermitteln. Ferner erhalten die Beacons als Major-ID die ID der zugehörigen Zone, die Minor-ID ist eine fortlaufende Nummerierung. Aus Kapitel 7 geht hervor, dass die Anzahl der Beacons größer drei zu wählen ist, um unter anderem NLOS Situationen zu vermeiden. Für die Umsetzung wird, wie bereits bei der Beschreibung der Testparameter im vorangegangenen Kapitel angesprochen, ein Filter eingesetzt, um zwischen den Beacons im selben Gang und Beacons im Nachbargang unterscheiden zu können. Zusätzlich werden hierdurch Beacons des gleichen Gangs ausgeschlossen, die zu weit entfernt oder hinter dem Kommissionierer liegen. Der Filter kann mit einer Art Bounding Box verglichen werden, welche der Kommissionierer um sich trägt und nur solche Beacon in die Berechnung einfließen, die innerhalb der genannten Box liegen. Die Justierung des Filters muss auf das entsprechende Lager angepasst werden. Die Anordnung der Beacons erfolgt so, dass diese in Gruppen zu je drei Beacons in einem annähernd gleichseitigen Dreieck angeordnet werden. Es wird gezeigt, dass sich diese Anordnung positiv auf die Genauigkeit auswirkt. Somit kann innerhalb der Warengänge die Position mittels (Tri-)Lateration geschätzt werden.

Beim Zonenübergang könnte es passieren, dass der Kalibrierungspunkt trotz der Aufteilung in Zonen zu weit vom aktuellen Standort entfernt ist. Hierdurch könnten sich, wie in Abschnitt 7.4.2 angesprochen, die äußeren Umstände soweit ändern, dass sich hieraus ungenaue Abstandsschätzungen ergeben. Um dem entgegenzuwirken, wäre es möglich die vier Beacon im Zentrum des Warengangs (zwei äußeren je Zone) doppelt zu kalibrieren und je nach Situation zu entscheiden, welche Kalibrierung zum Einsatz kommt. Die Entscheidung kann dadurch erfolgen, dass das Beacon, welches in der aktuellen Situation die höchste Signalstärke aufweist, mit seinem Standort die Wahl der Kalibrierung bestimmt. Die Datenstruktur der Beacons ist in diesem Fall ebenfalls anzupassen, sodass mehrere

Kalibrierungen, referenziert mit der jeweiligen Zone, persistiert werden können.

Da in den Verbindungsgängen eine grobe Positionierung ausreichend ist, werden für die Richtungsangaben sogenannte *Wächterbeacons* an den Stirnseiten der Regale platziert. Diese werden in Abbildung 8.2 als Dreiecke dargestellt. Aus dem Grundlagenkapitel geht hervor, dass mithilfe des *iBeacon*-Protokolls eine grobe Abstandsschätzung erfolgen kann, die Ranging genannt wird. Hierzu werden für die genannten Situationen alle Beacons zu einer Region (*CLRegion*) zusammengeschlossen und mittels Ranging überwacht. Befindet sich eines der Beacons in Reichweite, kann über das *Proximity*-Attribut festgestellt werden, in welcher Zone sich der Empfänger befindet. Da die Zonen sehr weit gefasst sind und nicht direkt angepasst werden können, ist es weiter sinnvoll die Sendeleistung der Wächterbeacons so gering einzustellen, dass das Signal nur noch in einer Entfernung von ca. 2 m empfangen werden kann. Hierdurch steht zwar nicht mehr die Zone 'Far' zur Verfügung dafür lässt sich die Zone 'Near' auf den genannten Radius begrenzen und der Benutzer kann über einen bevorstehenden Richtungswechsel informiert werden, sobald er sich kurz vor dem Beacon befindet.

Sofern sich diese Methode im Umfeld des speziellen Warenlagers als zu ungenau erweist, ist es ebenfalls möglich auf der Grundlage von vorangegangenen Untersuchung der Signalstärke, wie sie unter anderem in Kapitel 6 durchgeführt wurden, eigene *Proximity*-Zonen zu implementieren.

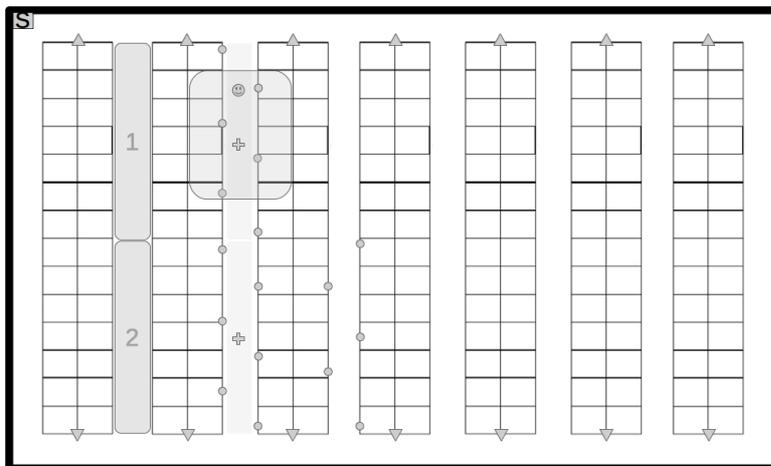


Abbildung 8.2: Der linke Warengang stellt die Aufteilung in zwei Zonen dar. Der rechte Warengang zeigt, die Platzierung der sechs Beacons (Kreise) pro Zone, den Kommissionierer (Smiley) umgeben von der Bounding Box sowie den Kalibrierungspunkten (Kreuz) in der Mitte der jeweiligen Zone.

Zusätzlich können Wächterbeacons an wichtigen Positionen, wie dem Drucker, angebracht werden. Hierdurch ist es möglich, dass nach Abschluss der Kommissionierung der Auftrag zum Druck der Versandetiketten nicht manuell gestartet werden muss, sondern automatisch angestoßen wird, sobald sich der Kommissionierer in der Nähe (*Proximity*)

des Druckers befindet. Außerdem wird zusätzlich die notwendige Selektion der dem Kommissionierer zugehörigen Etiketten vermieden, welche auftritt, wenn Druckaufträge manuell lagerweit gestartet werden, obwohl sich der Benutzer noch nicht am Drucker befindet.

8.3 Schlüsselsituationen

Auf Grundlage des zuvor beschriebenen Konzepts sind Positionsschätzungen im Lager möglich. Bei Kenntnis über das Wegenetz und der Warenlagerplätze, d.h. wo welche Ware eingelagert wurde, kann bei einer vorliegenden Bestellung die effizienteste Tour mittels eines Algorithmus zur Lösung des TSP ermittelt werden (vgl. Kapitel 4). Dies verspricht besonders bei der chaotischen Lagerhaltung große wirtschaftliche Vorteile. Im Folgenden wird eine Auswahl von Schlüsselsituationen bei der Navigation beschrieben.

Wie in Abbildung 8.3 zu sehen, wird beim Start der Navigation durch einen großen Richtungspfeil auf der rechten Seite des Bildschirms die Laufrichtung angezeigt. Der untere kleinere Pfeil stellt die Vorschau der darauffolgenden Anweisung dar. Zusätzlich erhält der Benutzer die Informationen über den Zielwarengang, den Lagerplatz und den Namen der Ware. Alle Artikel werden in einer Liste dargestellt. In der oberen Hälfte wird zur besseren Übersicht der Lagerplan angezeigt und farblich die Route zum jeweiligen Lagerplatz hervorgehoben. Kommt er in die Reichweite des Wächterbeacons, welches am Regal des Zielwarengangs angebracht ist, zeigt die Anwendung einen Abbiegepfeil, um dem Benutzer den Laufrichtungswechsel mitzuteilen. Dies ist im gezeigten Mockup von Beginn an der Fall, da er sich bereits in Reichweite befindet und den nächsten Warengang zu wählen hat. Nach dem Abbiegen in den Warengang, wird mithilfe der angesprochenen Bounding Box die Beacons zur genauen Positionsbestimmung ermittelt. Durch Einblenden eines nach links oder rechts gerichteten Pfeils bekommt der Benutzer den Hinweis, auf welche Seite sich der Lagerplatz befindet. Zusätzlich kann dies anhand der Lagerkarte eingesehen werden.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass der Anwender den Anweisungen des Endgerätes folgt. Jedoch gibt es eine Menge möglicher Ausnahmesituationen, von denen nachfolgend eine Auswahl beschrieben und dargestellt werden soll, wie sich die Anwendung in diesen verhält.

- **Falscher Warengang gewählt:** Der Benutzer könnte entgegen der Anweisung des Endgerätes in den davor oder den dahinter liegenden Warengang abbiegen. Wird einer der davor liegenden Warengänge gewählt kann keine oder lediglich eine sehr geringe Signalstärke zu den Beacons des korrekten Warengangs gemessen werden. Stattdessen wird von den Beacons des aktuellen Gangs eine sehr hohe Signalstärke gemessen. Biegt der Benutzer in einer der dahinter liegenden Warengänge ein, kann dies ebenfalls an der gemessenen Signalstärke zu den umliegenden Beacons erkannt werden. Hier existieren zwei mögliche Verfahrensweisen. Einerseits könnte dem Benutzer visuell dargestellt werden, dass er von der geplanten Route abgewichen ist und umkehren soll. Andererseits wäre es möglich unter Berücksichtigung des aktuellen Standortes eine Neuberechnung der Tour vorzunehmen.

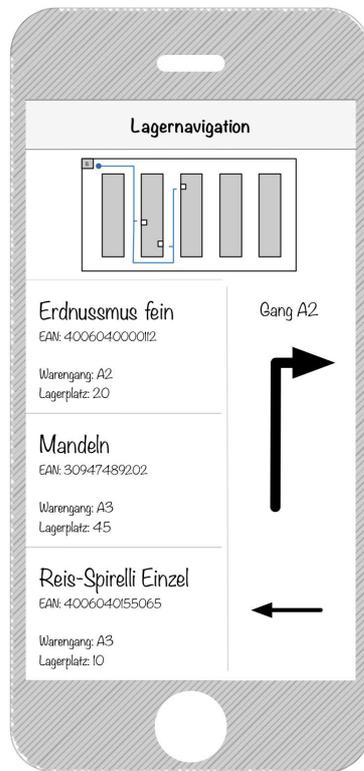


Abbildung 8.3: Mockup Lagernavigation

- **Lagerplatz verpasst:** Außerdem könnte der Benutzer an dem vom Endgerät korrekt navigierten Lagerplatz vorbeigegangen sein. Innerhalb der Gänge findet eine genauere Positionsbestimmung als außerhalb der Gänge mit den Wächterbeacons statt. Daher kann zeitnah festgestellt werden, ob der Lagerplatz passiert wurde. Dies könnte beispielsweise durch die Kombination eines Stoppschildes und eines Richtungspfeils visuell kommuniziert werden.

8.4 Zwischenfazit Einsatz im Warenlager

Dieses Kapitel hat ein Konzept zur Verwendung der *iBeacon*-Technologie im Warenlager vorgestellt. Hierzu wird zunächst aufgezeigt, dass in den Verbindungsgängen eine geringere Positionierungsgenauigkeit gefordert ist als in Warengängen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der zuvor behandelten Kapitel werden Warengänge in zwei Zonen unterteilt und diese jeweils mit sechs Beacons bestückt. Die Anordnung der Beacons geschieht möglichst in einem gleichseitigen Dreieck. In den Verbindungsgängen sorgen Wächterbeacons dafür, dass der Kommissionierer den richtigen Warengang findet. Abschließend wird erläutert, welche Instruktionen eine Lagernavigation in Schlüsselsituationen zu vermitteln hat.

Kapitel 9

Ergebnisse

Dieses Kapitel dient zur Vorstellung der in dieser Arbeit erreichten Ergebnisse bei der Untersuchung der *iBeacon*-Technologie im Hinblick auf den möglichen Einsatz für die Positionsbestimmung im Gebäude. Hierbei spielt stets das spätere Einsatzgebiet eine wichtige Rolle.

Zunächst wird das von *Estimote* zur Verfügung gestellte Indoor Location SDK evaluiert, das mit einer sehr guten Genauigkeit beworben und für den Einsatz von *iBeacons* im Gebäude gedacht ist. Aus diesem Grund wird es hinsichtlich der Genauigkeit der Positionsschätzungen im Stehen und Gehen (Navigation) in zwei verschiedenen Räumen überprüft. Hierbei zeigt sich, dass zwar der Einstieg in die Programmierung mit dem Indoor Location SDK frei von größeren Hürden ist, die Genauigkeit der Positionsschätzungen jedoch stark von der Ausrichtung des Geräts abhängt und durch NLOS-Situationen, die nicht in der Berechnung berücksichtigt werden, reduziert wird. Weiter wird deutlich, dass Randpositionen in einem Raum wesentlich schlechter geschätzt werden, als die Mitte des Raumes und in kleineren Räumen der Fehler der Positionsschätzungen kleiner wird. In einem Navigationsszenario kann das SDK jedoch nicht überzeugen, da es die aktuelle Position mit großen Fehlern angibt. Dies lässt sich in beiden Testumgebungen beobachten. Die Hauptprobleme liegen neben der niedrigeren Genauigkeit vor allem in der Bewegungen in der aktuellen Einsatzmöglichkeiten, die sich auf einen rechteckigen Raum beschränken. Die Software befindet sich in einem frühen Entwicklungsstadium. Des Weiteren ist kein Einblick in die innere Struktur möglich, um Korrekturen in der Berechnung oder gar Erweiterungen vorzunehmen, die sich positiv in der Genauigkeit niederschlagen.

Auch wenn das Indoor Location SDK auf Grund der genannten Probleme für die vorgesehene Verwendung in einem Warenlager nicht in Frage kommt, hat das Kapitel einen Eindruck vermittelt, was zumindest mit der *iBeacon*-Technologie hinsichtlich Indoor-Positionierungen möglich ist.

Um ein eigens auf der *iBeacon*-Technologie aufsetzendes Indoor-Positionierungssystem und spätere -Navigation für iOS entwickeln zu können, bedarf es einer näheren Untersuchung der Signalstärkecharakteristik und verschiedenen Anwendung verschiedener Software

und am Sender eingestellten Sendeleistungen. Hierbei zeigt sich, dass die empfangenen Signalstärken bei einer am Beacon eingestellten Sendeleistung von +4 dBm und -8 dBm eine annähernd identische Streuung um den Mittelwert aufweist. Bei der Sendeleistung -12 dBm kann hingegen eine sehr viel höhere Streuung gemessen werden. Hierdurch lässt sich, vor allem bei einer sehr geringen Stichprobe von RSSI-Werten, wie es im angedachten Szenario der Fall sein wird, der Erwartungswert nur sehr ungenau bestimmen, was wiederum in ungenauen Positionsschätzungen resultiert. Beim Vergleich des Core Location Frameworks mit dem Estimote SDK wird deutlich, dass unter dem Einsatz des Core Location Frameworks deutlich mehr Ausreißer auftreten und Fehlmessungen (RSSI-Wert konnte aus dem Advertising-Paket nicht ermittelt werden) eine höhere Auftrittswahrscheinlichkeit besitzen. Hinzu kommt, dass das Core Location Framework lediglich einen RSSI-Wert pro Sekunde liefert während das Estimote SDK fünf pro Sekunde zurückgibt. Hierdurch stellt sich heraus, dass sich die Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm in Verbindung mit dem Estimote SDK für die Verwendung im angestrebten System am besten eignen.

Anschließend wird anhand der qualifizierten Signalstärken untersucht, welche Auswirkungen Winkel- und Orientierungsänderungen auf die gemessene Signalstärke haben. Hierzu werden drei Radien im Abstand 1 m, 2 m und 3 m um den Empfänger gezogen und diese Radien in 13 Winkel unterteilt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiede in den mittleren gemessenen Signalstärken an den drei Radien oft sehr geringe Unterschiede aufweisen. Häufig werden sogar an größeren Abständen höhere Signalstärken als an niedrigeren Abständen gemessen. Dies verdeutlicht, welche Probleme die Abstandsmessung basierend auf RSSI-Werten mit sich bringt und dass hierdurch keine exakten Messungen möglich sind. Zusätzlich konnte exemplarisch unter dem Einsatz der Signalstärke +4 dBm herausgestellt werden, welchen Einfluss Orientierungsänderungen des Benutzers und des Empfängers auf die RSSI-Werte haben. Anhand der durchgeführten t-Tests wird gezeigt, dass die Abweichungen der mittleren RSSI-Werte bei tangentialer Ausrichtung zum *iBeacon* zufälliger Natur sind. Bei vom Beacon abgewandter Ausrichtung hingegen werden signifikant geringere Werte im Mittel gemessen. Weiter wird festgestellt, dass unter dieser Ausrichtung signifikant mehr Fehlmessungen auftreten als unter frontaler Ausrichtung.

Aufgrund der Signalstärkeuntersuchungen wird unter anderem deutlich, wie wichtig ein Modell zur Beschreibung der Signalausbreitung im Gebäude ist, um die Distanz zwischen Sender und Empfänger möglichst genau schätzen zu können. Das Log-distance Path-Loss Model wird aufgrund vielversprechender Referenzen für den Einsatz in dem zu implementierenden Indoor-Positionierungssystem gewählt und beschrieben, wie dieses kalibriert werden kann. Da im späteren Warenlager eine große Anzahl von Beacons zum Einsatz kommt, wird eine Kalibrierungsmethode gewählt, von der einerseits ein mittlerer bis geringer Zeitaufwand vorauszusetzen ist und gleichzeitig Positionsschätzungen mit hoher Genauigkeit zu erwarten sind. Zur Bestimmung des sehr wichtigen Path-Loss Exponenten n wird der mittlere quadratische Fehler eingeführt, der den Schätzer hinsichtlich seiner Qualität beurteilt. Des Weiteren zeigt sich, wie die Lösung der Trilateration, also die Ermittlung der Schnittpunkte der Radien, mathematisch gelöst werden kann. Zur Lösungsbestimmung werden die drei Gleichungen, welche die Abstände zwischen aktueller Position und dem jeweiligen Beacon

beschreiben, in ein lineares Gleichungssystem überführt, um es leichter lösen zu können. Um den in der Praxis auftretenden Mess- und Signalungenauigkeiten Rechnung zu tragen, ist zudem eine Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) nötig.

Darüber hinaus werden Testparameter definiert, die sich auf die Genauigkeit der Positionsschätzungen auswirken können. Hierzu zählt neben der Anzahl der zur Verfügung gestellten Beacons ebenso die am Beacon eingestellte Sendeleistung. Außerdem werden die Beacon-Filter 'strong' und 'reliable' definiert, die zum Einsatz kommen, wenn von mehr als drei Beacons Signale empfangen werden, wie es im späteren Einsatz im Warenlager der Fall sein wird. Zusätzlich werden die zwei Berechnungsarten Multilateration und Multiple Trilateration bestimmt. Sie verfolgen zwei verschiedene Herangehensweisen, wie die Positionsschätzung erfolgen kann, wenn sich nach Anwendung der Filter mehr als drei Beacons qualifiziert haben. Eine folgende Beschreibung zeigt, wie der Prototyp zur Untersuchung der Testparameter für das Betriebssystem iOS umgesetzt wird.

Die Evaluation der Parameter, die für die Positionsschätzung an verschiedenen Positionen im Testumfeld mit einander kombiniert werden, ergibt, dass sich keine der Kombinationen absolut, das heißt an allen getesteten Positionen behaupten kann. Die Genauigkeit ist von sehr vielen Einflussfaktoren abhängig, weshalb eine Wahl der Parameter für das entsprechende Einsatzszenario getroffen werden muss. Für das vorliegende Szenario sind einerseits mehr als drei Beacons einzusetzen, um zu genügend Beacons Sichtkontakt zu haben und somit NLOS-Situationen zu vermeiden. Des Weiteren darf der Abstand zum Kalibrierungspunkt nicht zu groß werden; außerdem ist der Einsatz eines Beacon-Filters im Lager unabdingbar. Filter vermeiden die Einbeziehung von Beacons aus dem Nachbargang und solchen, die sich zu weit vom Empfänger entfernt befinden. Ferner spielt die Anordnung der Beacons eine wichtige Rolle und sollte zur Erhöhung der Genauigkeit möglichst in einem gleichseitigen Dreieck erfolgen. Die Sendeleistung von -8 dBm wird bevorzugt, da hierdurch in den schmalen Gängen des Lagers der Mehrwegempfang gemindert werden kann. Zwischen den Berechnungsarten kann sich zwar keine als die bessere herauskristallisieren, allerdings wird davon ausgegangen, dass durch den Einsatz der Multiplen Trilateration und einem darauf aufbauenden Filter für Ausreißer in der Positionsschätzung, die Genauigkeit weiter gesteigert werden kann. Auf Grundlage der definierten Bewertungskategorien wird davon ausgegangen, dass mindestens eine „befriedigende“ Genauigkeit (2,5 m) erreicht werden kann.

Abschließend wird auf Grundlage der gewonnenen Erfahrungen herausgestellt, wie die *iBeacon*-Technologie im Warenlager eingesetzt werden kann. Hierzu werden zunächst zwei verschiedene Arten von Lagergängen definiert, in welchen unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der Positionsschätzungen gestellt werden. Mittels Fusion aus dem durch das *iBeacon*-Protokoll bereitgestellte Proximity-Prinzip und der gezeigten (Tri-)Lateration zur genauen Bestimmung der Position wird ein Konzept zur Platzierung der Beacons aufgestellt. Des Weiteren werden Ansätze vorgestellt, an welchen Positionen welche Beacons im Warenlager zu kalibrieren sind, um möglichst genaue Schätzungen zu erhalten. Eine abschließende Vorstellung von Schlüsselszenarien kann zeigen, wie sich eine zukünftige Lagernavigation verhält und mit dem Kommissionierer interagiert.

Damit wird das gesetzte Ziele der vorliegenden Arbeit, die Untersuchung der *iBeacon*-

9. ERGEBNISSE

Technologie auf ihren Einsatz für die Standortbestimmung mit Bezug auf die moderne Lagerverwaltung, erreicht. Ferner wird eine solide Basis zur Implementierung einer Lagernavigation geschaffen, die das Problem der Laufwegekoordination im Warenlager lösen und somit die Lagerverwaltung, besonders unter Einsatz der chaotischen Lagerhaltung, effizienter gestalten kann.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird die vorliegende Arbeit zusammenfassend betrachtet und aufgezeigt, welche Problemstellungen zukünftig zu bearbeiten sind.

10.1 Zusammenfassung

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz der *iBeacon*-Technologie in der modernen Lagerverwaltung. In dieser muss für einen effizienten Umgang mit dem Faktor Zeit sowohl beim Wareneingang als auch bei der Kommissionierung gesorgt werden und eine Koordination der Laufwege stattfinden. Besonders bei der dynamischen Platzzuordnung (chaotische Lagerhaltung) stellt sich die Frage, wo die neu eingetroffene Ware einzulagern ist und wie bei einer vorliegenden Bestellung die Ware effizient zusammengestellt werden kann, ohne dass zu lange Wege gewählt oder gar Wege mehrfach gelaufen werden. Hierbei kann eine Indoor-Navigation Abhilfe schaffen, welche jeweils die kürzeste Route für den gegenständlichen Auftrag berechnet und den Benutzer zielgerichtet navigiert.

Das Problem der Indoor-Navigation kann in die drei Teilprobleme Positionsbestimmung im Gebäude, Routenplanung und die eigentliche Navigation gegliedert werden. Die Positionsbestimmung ist grundlegender Bestandteil einer Navigation. Dabei handelt es sich jedoch, genau wie bei der *iBeacon*-Technologie um ein sehr junges Forschungsgebiet, weshalb zuerst in diesem Bereich Erkenntnisse gewonnen werden müssen. Die Routenplanung ist hingegen ein bereits weit erforschtes Gebiet, die eigentliche Navigation ist als Fusion der beiden Bereiche zu sehen, um über Richtungsänderungen entscheiden zu können.

Zunächst kann durch die Evaluation des Indoor Location SDKs der Firma *Estimote* ein Einblick in die Umgangsweise mit und die Möglichkeiten von *iBeacons* bei der Indoor-Positionierung gewonnen werden. Allerdings erreicht dieses nicht die angegebene Genauigkeit von 0,5 m bis 1,0 m. Vor allem in der Bewegung werden unzureichende Schätzungen erreicht. Zusätzlich besteht keine Möglichkeit Einblick in innere Abläufe des SDKs zu bekommen, da es als Closed Source zur Verfügung gestellt wird. Generell befindet es sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und kann lediglich in einem einzigen Raum mit einer rechtecki-

gen Grundfläche eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden für die Implementierung eines eigenen Systems zunächst Signalstärkeuntersuchungen vorgenommen, um ein Verständnis für die Ausbreitung der Signalwellen zu erhalten. Hierbei hat sich das Estimote SDK (existiert neben dem Indoor Location SDK) gegenüber dem seitens *Apple* vorgesehenen Core Location Framework für die Indoor-Positionierung als besser geeignet herausgestellt.

Des Weiteren werden drei verschiedene Signalstärken auf deren Verwendung im System evaluiert. Hieraus ergibt sich, dass die Streuung der empfangenen Signalstärken bei den Sendeleistungen +4 dBm und -8 dBm am geringsten ist und aus diesem Grund für die weitere Verwendung vorgesehen sind. Die Untersuchungen der empfangenen Signalstärke (RSSI) an den Radien 1 m, 2 m und 3 m bei 13 verschiedenen Winkeln zum Beacon haben gezeigt, wie unterschiedlich die Signalausbreitung sein kann. Anhand der RSSI-Werte lassen sich oft keine Unterscheidung in den drei gewählten Abständen erkennen, da entweder die Unterschiede zu gering sind oder an größeren Distanzen höhere Werte gemessen werden. Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass eine tangentiale Ausrichtung zum Sender im Vergleich zur frontalen keine signifikanten Unterschiede bei den RSSI-Werten provozieren kann. Bei abgewendeter Ausrichtung (rückwärts) zum *iBeacon* sind die Signalwerte jedoch deutlich geringer und können anhand des durchgeführten t-Test als signifikant bezeichnet werden. Darüber hinaus wird festgestellt, dass in dieser Ausrichtung die Anzahl von Fehlmessungen signifikant zunimmt. Aus diesem Grund gilt es diese Ausrichtung für die Abstandsmessung zu vermeiden.

Durch die Untersuchung der RSSI-Werte in verschiedenen Situationen wurde deutlich, wie wichtig ein Modell zur Beschreibung des Pfadverlusts ist. Das Kapitel 7 beschreibt, wie die Positionsbestimmung mathematisch zu lösen ist und zeigt, wie die Parameter des hier gewählten Log-Distance Path-Loss Modells zu bestimmen sind (Punktkalibrierung). Da trotz des Modells keine genauen Abstandsmessungen zwischen Sender und Empfänger sondern lediglich Schätzungen möglich sind, muss zur Lösung der Trilateration eine Ausgleichsrechnung stattfinden, die mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt wird. Zur weiteren Untersuchung, wie die Genauigkeit von Positionsschätzungen erhöht werden kann, werden insgesamt vier Testparameter aufgestellt: Beaconanzahl (3, 4, 5, 6), Sendeleistung (+4 dBm und -8 dBm), Beacon-Filter (kein Filter, 'strong' und 'reliable') und Berechnungsart zur Positionsschätzung (Multilateration und Multiple Trilateration). Diese Testparameter, die Kalibrierung des Log-Distance Path-Loss Modells und der zuvor beschriebene Lösungsweg der Trilateration sind Gegenstand der Implementierung. Auf Grundlage der Testergebnisse ergibt sich, dass keine Kombination der Parameter universell einsetzbar ist und die Genauigkeit von sehr vielen Einflussfaktoren abhängt. Stattdessen muss der dahinterliegende Einsatzzweck berücksichtigt werden. In Bezug auf das Warenlager und einem definierten Modell kann festgelegt werden, dass mehr als drei Beacons einzusetzen sind, um eine Ausfallsicherheit des Systems gewährleisten und Schätzungen auf Grundlage von NLOS-Situationen vermeiden zu können. Des Weiteren bedeutet der Einsatz eines Beacon-Filters häufig eine höhere Genauigkeit und ist in Bezug auf das Lager unerlässlich, um Beacons des Nachbargangs und solche, die sich in zu großer Entfernung befinden, nicht in die Berechnung einfließen zu lassen. Weiter darf der Abstand zwischen Kalibrierungspunkt und Messposition nicht zu groß werden, da hierdurch das Modell, je nach äußeren

Umständen, nicht mehr genau genug arbeitet. Ein weiterer Punkt, der sich aus den Messergebnissen und der Literatur ergibt, ist die Relevanz der Anordnung der Beacons. Durch eine Anordnung in gleichseitige Dreiecke lässt sich der Fehler in den Schätzungen reduzieren. Bezüglich der Sendeleistung besteht die Vermutung, dass durch den Einsatz von -8 dBm der Mehrwegempfang in schmalen Lagergängen reduziert und somit die Genauigkeit gesteigert werden kann. Ferner ist die Multiple Trilateration der Multilateration vorzuziehen, sofern diese mit einem Filter für Ausreißer in der Positionsschätzung erweitert wird.

Schließlich wird auf Grundlage der Erkenntnisse und des definierten Lagermodells ein Konzept für den Einsatz der *iBeacons* zur Verwendung in einer Lagernavigation ausgearbeitet. Ferner konnten Schlüsselsituationen erläutert werden, die aufzeigen, wie die Software in diesen Situationen mit dem Benutzer interagiert.

10.2 Ausblick

Wie bereits erwähnt, ist zunächst auf Grundlage des vorliegenden Konzepts ein System zur Indoor-Navigation zu implementieren. Außerdem ist zu prüfen, welche der zwei Sendeleistungen höhere Genauigkeiten in der Positionsbestimmung hervorbringt. Des Weiteren haben sich bereits die gezeigten Filter 'strong' und 'reliable' als wichtig erwiesen, trotzdem ist auch hier weiterer Forschungsbedarf vorhanden, um herauszustellen, welcher Filter für die Verwendung qualifizierter ist. Ergeben sich bei der Navigation durch das Warenlager große sprunghafte Positionsschätzungen, ist hierfür ein weiterer Filter einzusetzen, der diese glätten und somit zur Fehlerreduzierung beitragen kann (vgl. Kalman-Filter [Far12]).

Weiter ist zu prüfen, wie die zur dynamischen Schätzung des Path-Loss Exponenten n in Kapitel 2 vorgestellte Vorgehensweise der Autoren Rodas und Escudero [RE09] im vorliegenden Konzept umgesetzt und damit die Kalibrierungsphase umgangen werden kann.

Bei bestehender Navigation ist ein Algorithmus zu entwickeln, um mehrere von den Laufwegen passende Bestellungen parallel in einem Kommissionierungsvorgang bedienen zu können (Multi-Order-Picking). Dies würde zu einem weiteren, nicht unwesentlichen Vorteil in der Lagerverwaltung führen.

Anhang A

Phänomene der Wellenausbreitung

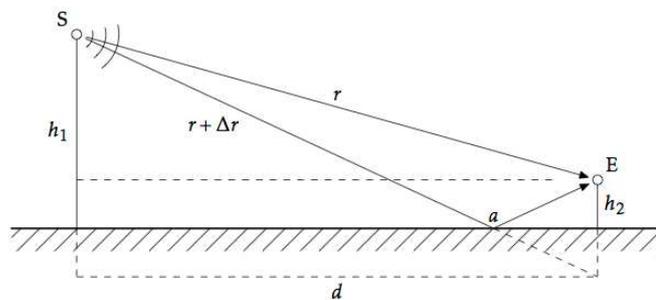


Abbildung A.1: Reflexion elektromagnetischer Wellen an der Erdoberfläche. In Indoor-Szenarien tritt die Reflexion häufig an Wänden oder Mobiliar auf.
Quelle: [DS12, S. 232]

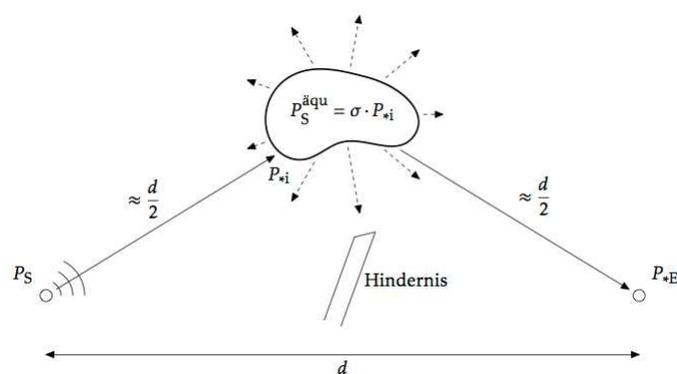


Abbildung A.2: Streuung elektromagnetischer Wellen an kleinsten Teilchen wie zum Beispiel Staubpartikel oder Wassermoleküle.
Quelle: [DS12, S. 237]

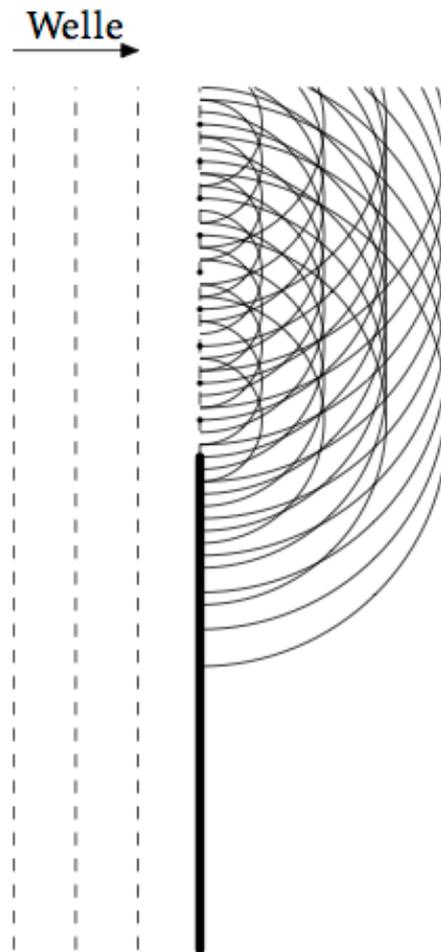


Abbildung A.3: Beugung der elektromagnetischen Welle an den Kanten der Gegenstände. Die neu entstandene Welle breitet sich von dort in alle Richtungen aus, wodurch auch im Schatten der Gegenstandes (rechte Seite der schwarzen kräftigen Linie) eine Signalstärke gemessen werden kann.

Quelle: [DS12, S. 239]

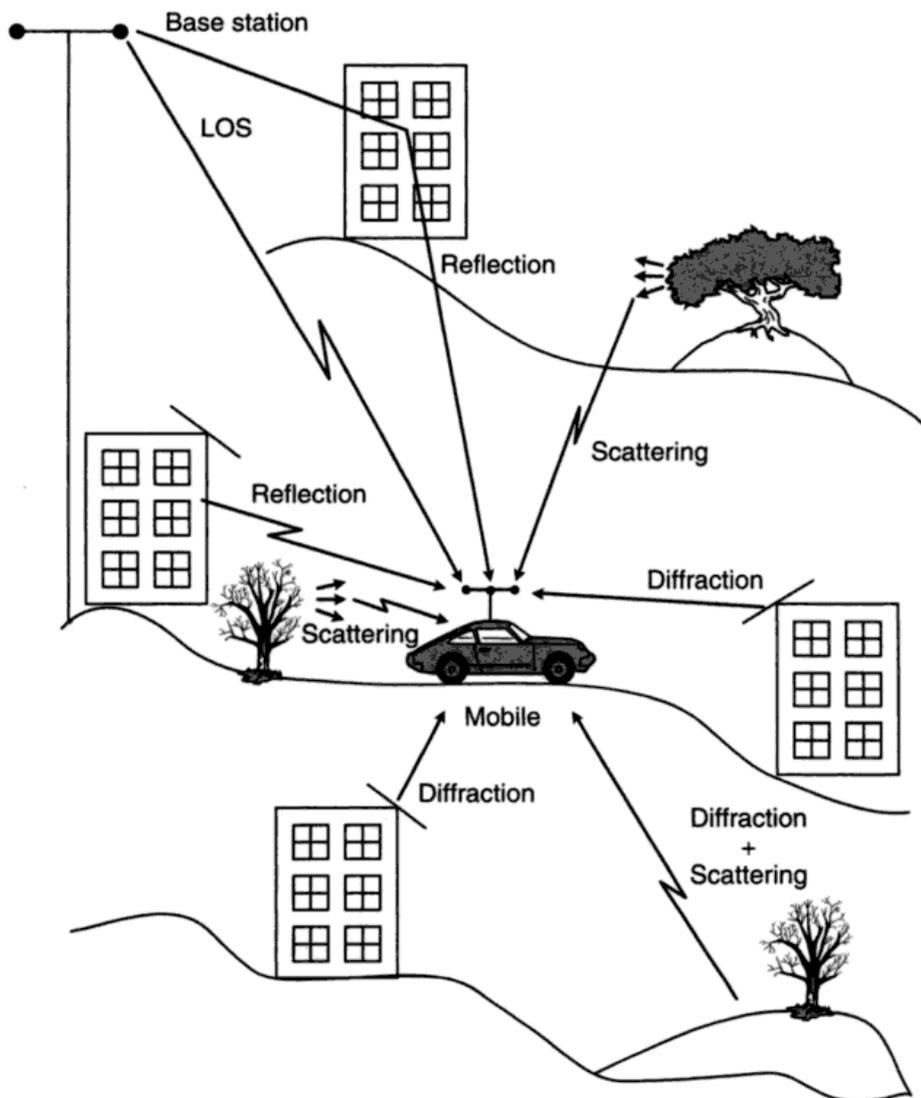


Abbildung A.4: Entstehung des Mehrwegeempfangs bedingt durch die Phänomene Reflexion, Streuung und Beugung. Besteht ein Sichtkontakt (LOS) zum Sender ist hierdurch ein weiterer, in diesem Fall lediglich durch die Freidämpfung beeinflusster Empfangsweg gegeben.

Quelle: [BA02, S. 4]

Anhang B

Estimate Indoor Location

B.1 Location Setup

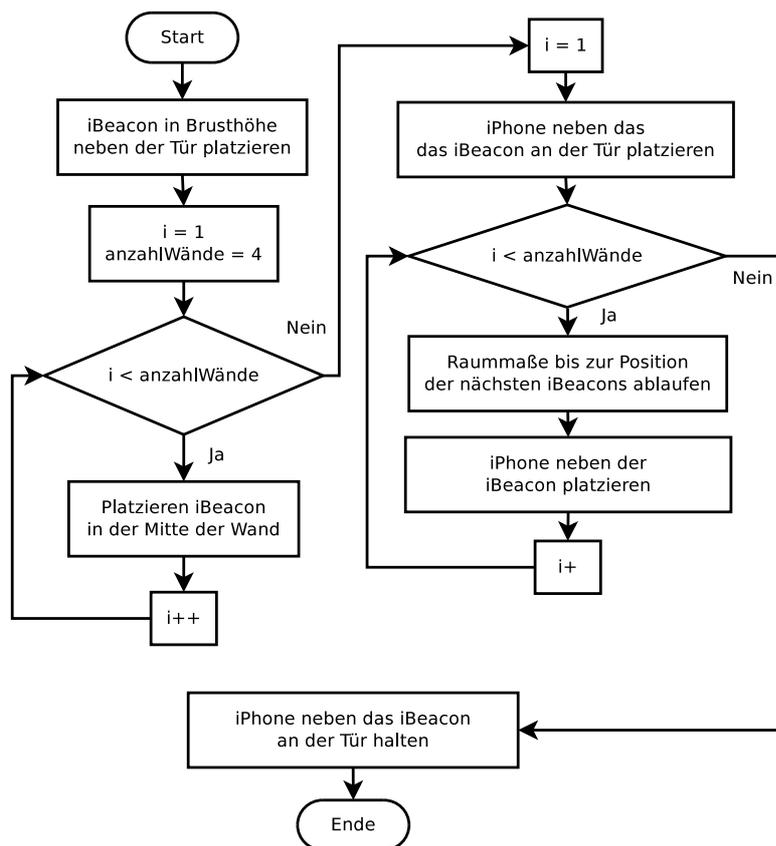


Abbildung B.1: Estimate Indoor Location Setup Prozess

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an [est14a], Abgerufen: 14.02.2015

B. ESTIMOTE INDOOR LOCATION

```
1  {
2    "beacons": [
3      {
4        "position": {
5          "x": -4.1,
6          "y": 0,
7          "orientation": 92
8        },
9        "beacon": {
10         "mac": "c146d76f14a4",
11         "color": 0
12       }
13     }, {
14       "position": {
15         "x": 0,
16         "y": 4.15,
17         "orientation": 182
18       },
19       "beacon": {
20         "mac": "f5fe78617679",
21         "color": 2
22       }
23     }, {
24       "position": {
25         "x": 4.1,
26         "y": 0,
27         "orientation": 272
28       },
29       "beacon": {
30         "mac": "d79d52eb20c7",
31         "color": 1
32       }
33     }, {
34       "position": {
35         "x": 0,
36         "y": -4.15,
37         "orientation": 2
38       },
39       "beacon": {
40         "mac": "c3c0d09e6fd9",
41         "color": 1
42       }
43     }
44   ],
45   "name": "aufenthaltsraum.json",
46   "walls": [
47     {
48       "x2": -4.1,
49       "x1": -4.1,
50       "orientation": 92,
51       "y2": 4.15,
52       "y1": -4.15
53     }, {
54       "x2": 4.1,
55       "x1": -4.1,
56       "orientation": 182,
57       "y2": 4.15,
58       "y1": 4.15
59     }, {
60       "x2": 4.1,
61       "x1": 4.1,
62       "orientation": 272,
```

```
63     "y2": -4.15,
64     "y1": 4.15
65   }, {
66     "x2": -4.1,
67     "x1": 4.1,
68     "orientation": 2,
69     "y2": -4.15,
70     "y1": -4.15
71   }
72 ],
73 "doors": [
74   {
75     "x2": -4.1,
76     "x1": -4.1,
77     "orientation": 92,
78     "y2": 1,
79     "y1": 2
80   }
81 ],
82 "orientation": 0,
83 "creationDate": "2014-11-10 T10:22:55.021 "
84 }
```

Listing B.1: JSON-Struktur des Aufenthaltsraumes bei *Viison* zur Verwendung im Indoor Location SDK. Die Orientierung der Wände- und Beacon-Objekte ist der in Abbildung 5.2 beschriebene Winkel. Er beschreibt die Ausrichtung des jeweiligen Objektes.

B.2 Beispielcode

```
1  #import "LocationViewController.h"
2  #import "ESTIndoorLocationManager.h"
3  #import "ESTIndoorLocationView.h"
4  #import "ESTLocationBuilder.h"
5
6  @interface LocationViewController () <ESTIndoorLocationManagerDelegate>
7
8  @property (nonatomic, strong) ESTIndoorLocationManager *manager;
9  @property (nonatomic, strong) ESTLocation *location;
10 @property (nonatomic, strong) ESTBeaconManager *beaconManager;
11
12  ...
13
14  - (void) viewDidLoad
15  {
16      [super viewDidLoad];
17
18      //1. Manager anlegen und Delegate zuweisen
19      self.manager = [[ESTIndoorLocationManager alloc] init];
20      self.manager.delegate = self;
21
22      //2. Location laden und instanziiieren
23      NSString *path = [[NSBundle mainBundle] pathForResource:@"aufenthaltsraum"
24                      ofType:@"json"];
25      NSString *content = [NSString stringWithContentsOfFile:path encoding:
26                          NSUTF8StringEncoding error:nil];
27      self.location = [ESTLocationBuilder parseFromJSON:content];
28
29      //3. Location der View zuweisen
30      [self.indoorLocationView drawLocation:self.location];
31
32      //4. Manager mit Location starten
33      [self.manager startIndoorLocation:self.location];
34  }
35
36  ...
37
38  - (void) indoorLocationManager:(ESTIndoorLocationManager *)manager
39      didUpdatePosition (ESTOrientedPoint *)position inLocation:(ESTLocation *)
40      location
41  {
42      //5. Verarbeitung der Positionsupdates
43      [self.indoorLocationView updatePosition:position];
44  }
45
46  - (void) indoorLocationManager:(ESTIndoorLocationManager *)manager
47      didFailToUpdatePositionWithError:(NSError *)error
48  {
49      NSLog(@"failToUpdatePosition: %@", [NSError description]);
50  }
```

Listing B.2: Vereinfachte Darstellung der fünf wichtigsten Schritte zur Verwendung des Indoor Location SDKs.

B.3 Testergebnisse

B.3.1 Aufenthaltsraum

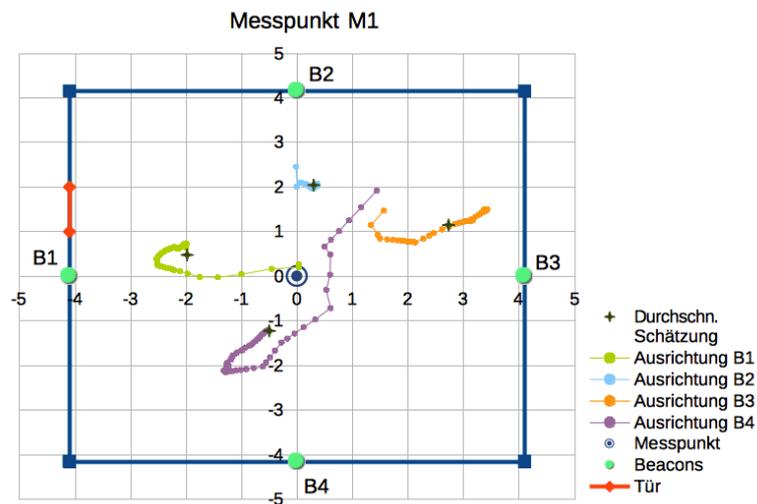


Abbildung B.2: Die geschätzten Positionierungen hängen stark von der Ausrichtung bzw. Orientierung des Benutzers ab.

Testergebnis an M4: Wechsel zwischen LOS und NLOS

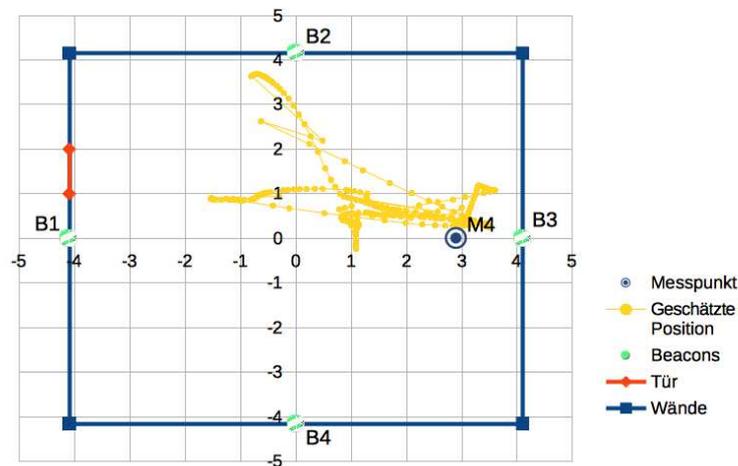


Abbildung B.3: Geschätzte Positionierungen schwanken stark zwischen LOS- und NLOS-Situationen zu Beacon B3.

B.3.2 Küche

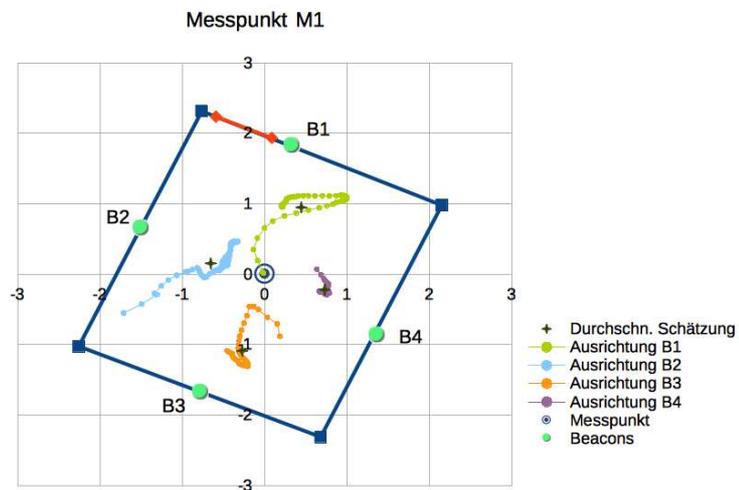


Abbildung B.4: Die geschätzten Positionierungen hängen stark von der Ausrichtung bzw. Orientierung des Benutzers ab.

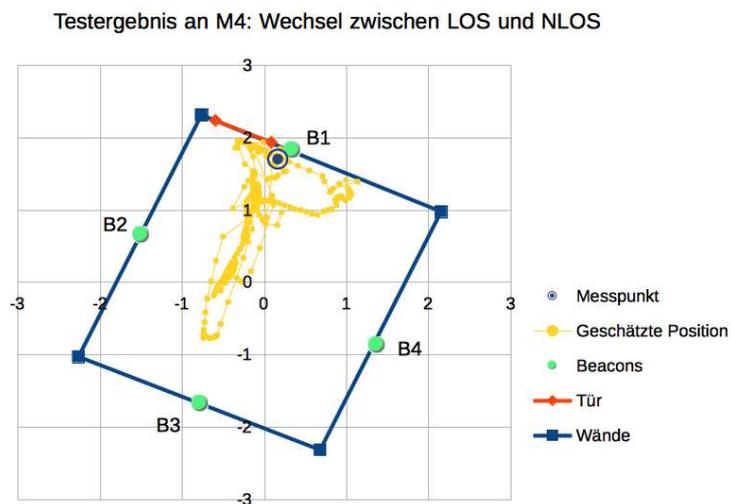


Abbildung B.5: Geschätzte Positionierungen schwanken stark zwischen LOS- und NLOS-Situationen zu Beacon B1.

Anhang C

Signaluntererschungen

C.1 Messergebnisse bei Ausrichtungsänderung

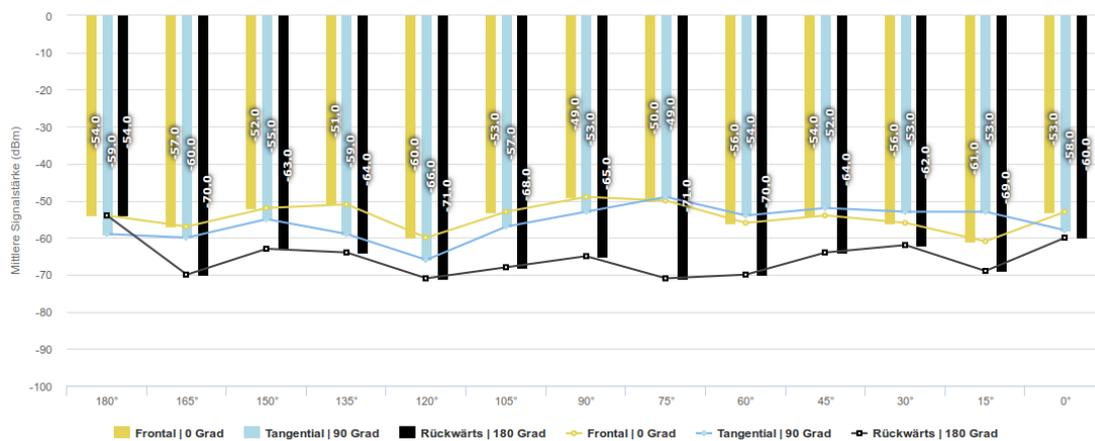


Abbildung C.1: RSSI-Werte bei einem Abstand von 1 m

C. SIGNALUNTERUSCHUNGEN

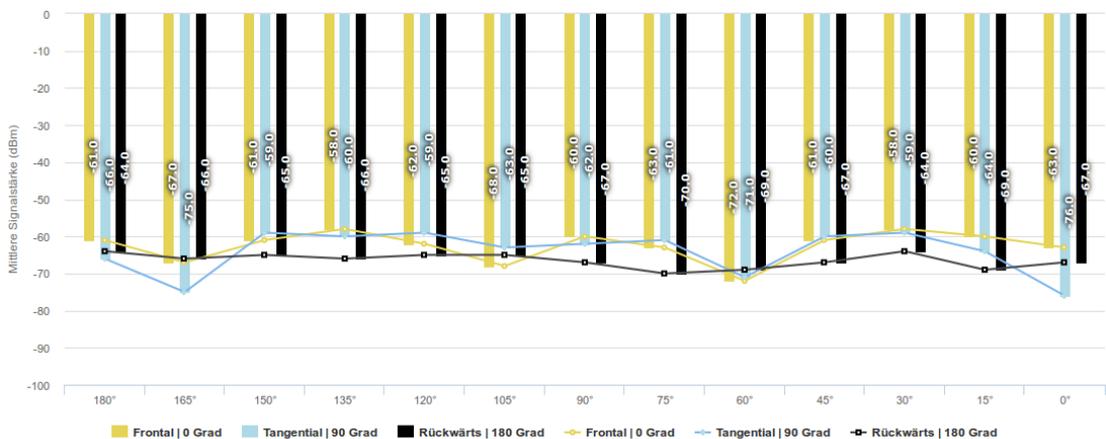


Abbildung C.2: RSSI-Werte bei einem Abstand von 2 m

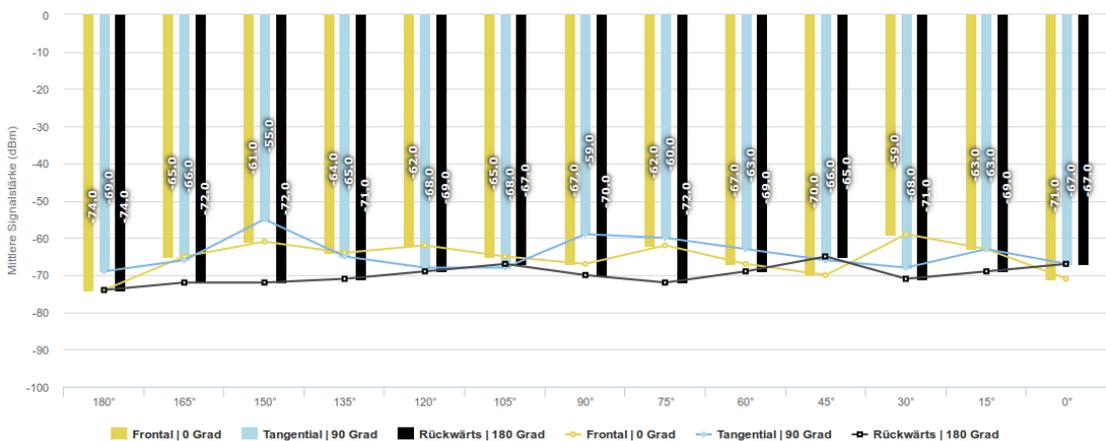


Abbildung C.3: RSSI-Werte bei einem Abstand von 3 m

C.2 t-Test: Frontal - Tangential

Paired Samples t-test on **FRONTAL** vs **TANGENTIAL** with 13 Cases Alternative = 'not equal'

Mean FRONTAL	: -54,308
Mean TANGENTIAL	: -56,000
Mean Difference	: 1,692
95,00% Confidence Interval	: -1,037 to 4,422
Standard Deviation of Difference	: 4,516
t	: 1,351
df	: 12
p-value	: 0,202

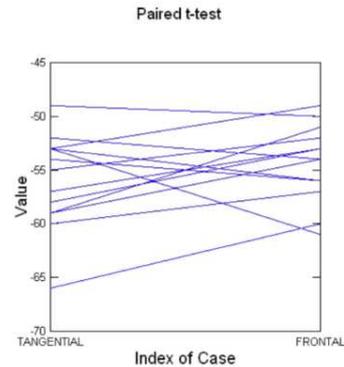


Abbildung C.4: Am Radius 1 m kann kein Unterschied zwischen den Messungen Frontal und Tangential nachgewiesen werden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit, dass sich die zwei Testgruppen unterschieden, liegt 20,2 %.

Paired Samples t-test on **FRONTAL** vs **TANGENTIAL** with 13 Cases Alternative = 'not equal'

Mean FRONTAL	: -62,615
Mean TANGENTIAL	: -64,231
Mean Difference	: 1,615
95,00% Confidence Interval	: -1,371 to 4,602
Standard Deviation of Difference	: 4,942
t	: 1,179
df	: 12
p-value	: 0,261

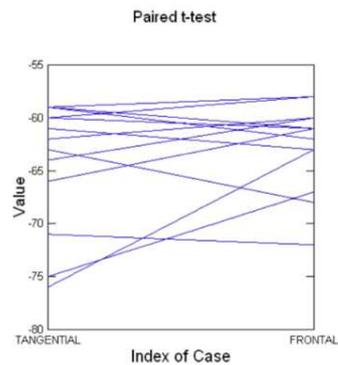


Abbildung C.5: Am Radius 2 m kann kein Unterschied zwischen den Messungen Frontal und Tangential nachgewiesen werden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit, dass sich die zwei Testgruppen unterschieden, liegt 26,1 %.

Paired Samples t-test on FRONAL vs TANGENTIAL with 13 Cases
Alternative = 'not equal'

Mean FRONAL	: -65,385
Mean TANGENTIAL	: -64,385
Mean Difference	: -1,000
95,00% Confidence Interval	: -3,981 to 1,981
Standard Deviation of Difference	: 4,933
t	: -0,731
df	: 12
p-value	: 0,479

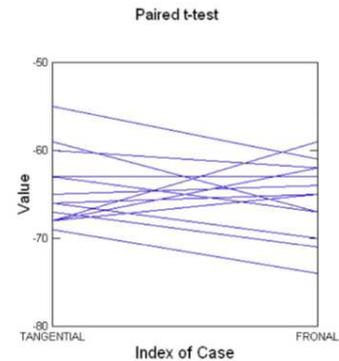


Abbildung C.6: Am Radius 3 m kann kein Unterschied zwischen den Messungen Frontal und Tangential nachgewiesen werden. Die Irrtumswahrscheinlichkeit, dass sich die zwei Testgruppen unterschieden, liegt 47,9 %.

C.3 t-Test: Frontal - Rückwärts

Paired Samples t-test on FRONTAL vs RUECKWAERTS with 13 Cases
Alternative = 'not equal'

Mean FRONTAL	: -54,308
Mean RUECKWAERTS	: -65,462
Mean Difference	: 11,154
95,00% Confidence Interval	: 7,986 to 14,321
Standard Deviation of Difference	: 5,242
t	: 7,672
df	: 12
p-value	: 0,000

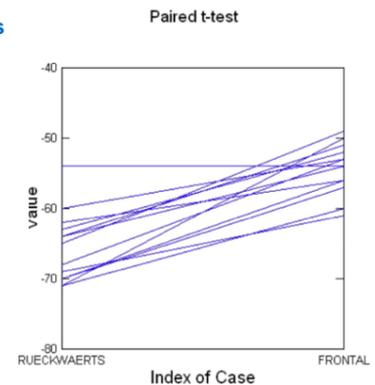


Abbildung C.7: Am Radius 1 m kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 0,1 % ein Unterschied zwischen den Gruppen nachgewiesen werden. Die Statistiksoftware *MyStat* berechnet maximal drei Nachkommastellen, weshalb an dieser Stelle die nächst größere Zahl für p angenommen wird.

Paired Samples t-test on FRONTAL vs RUECKWAERTS with 13 Cases
Alternative = 'not equal'

Mean FRONTAL	: -62,615
Mean RUECKWAERTS	: -66,462
Mean Difference	: 3,846
95,00% Confidence Interval	: 1,431 to 6,261
Standard Deviation of Difference	: 3,997
t	: 3,470
df	: 12
p-value	: 0,005

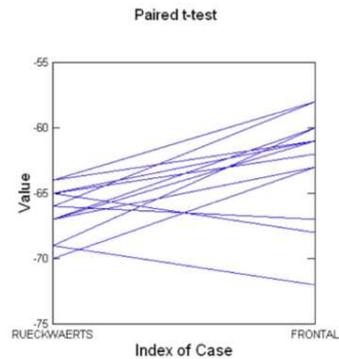


Abbildung C.8: Am Radius 2 m kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,5 % ein Unterschied zwischen den Gruppen nachgewiesen werden.

Paired Samples t-test on FRONAL vs RUECKWAERTS with 13 Cases
Alternative = 'not equal'

Mean FRONAL	: -65,385
Mean RUECKWAERTS	: -69,846
Mean Difference	: 4,462
95,00% Confidence Interval	: 1,211 to 7,712
Standard Deviation of Difference	: 5,379
t	: 2,990
df	: 12
p-value	: 0,011

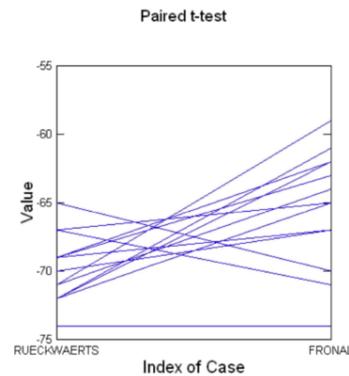


Abbildung C.9: Am Radius 3 m kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1,1 % ein Unterschied zwischen den Gruppen nachgewiesen werden.

C.4 Unabhängigkeitstest Fehlmessungen

Anhand des Vierfelder- χ^2 -Tests wird die Unabhängigkeit der Merkmale „Ausrichtung“ und „Fehlmessung“ mit den Ausprägungen „frontal“, „rückwärts“, „keine Fehlmessung“ und „Fehlmessung“ am 0,1%-Niveau überprüft.

Hierzu wird die Nullhypothese H_0 aufgestellt: Die genannten Merkmale Ausrichtung und Fehlmessung sind von einander unabhängig.

Die folgende Tabelle zeigt die Vierfeldertafel zur Berechnung von χ^2 :

Merkmal	Keine Fehlmessung	Fehlmessung (-100 dBm)	Summe
Frontal	1595 (a)	5 (b)	1600
Rückwärts	1266 (c)	34 (d)	1300
Summe	2861	39	2900

Tabelle C.1: Vierfeldertafel für die Merkmale Ausrichtung und Fehlmessung inkl. Randsummen zur Durchführung des χ^2 -Tests

Da $\chi_{1m}^2 \approx 28,67 > 10,83 = \chi_{(1;0,999)}^2$ wird H_0 abgelehnt. Demnach kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 % ausgesagt werden, dass die Merkmale „Ausrichtung“ und „Fehlmessung“ am Radius 1 m eine signifikante Abhängigkeit besitzen.

$$\begin{aligned}\chi_{1m}^2 &= \frac{n * (ad - bc)^2}{(a + b)(c + d)(a + c)(b + d)} & (C.1) \\ &= \frac{6653789000000}{232084320000} \\ &\approx 28,67\end{aligned}$$

Analog zur oben gezeigten Formel, kann die Berechnung für die Anzahl der Fehlmessungen am Radius 2 m durchgeführt werden. Hier können 23 von 1300 Messwerten als Fehlmessung identifiziert werden. Hieraus ergibt sich folgendes Ergebnis.

$$\begin{aligned}\chi_{2m}^2 &= \frac{2662461000000}{167265280000} & (C.2) \\ &\approx 15,92\end{aligned}$$

Da $\chi_{2m}^2 \approx 15,92 > 10,83 = \chi_{(1;0,999)}^2$ wird H_0 abgelehnt. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 % besteht auch am Radius 2 m eine signifikante Abhängigkeit zwischen den Merkmalen „Ausrichtung“ und „Fehlmessung“.

Anhang D

Indoor-Positionierungssystem

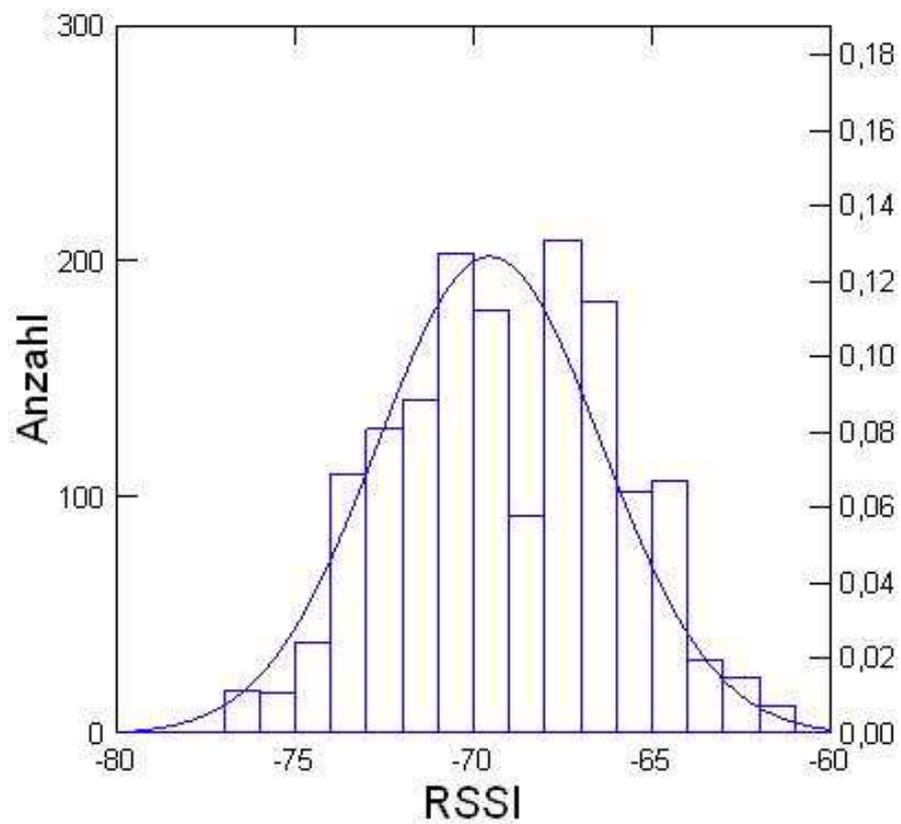


Abbildung D.1: Die RSSI-Werte unter Ausschluss der Fehlmessungen unterliegen einer Normalverteilung.

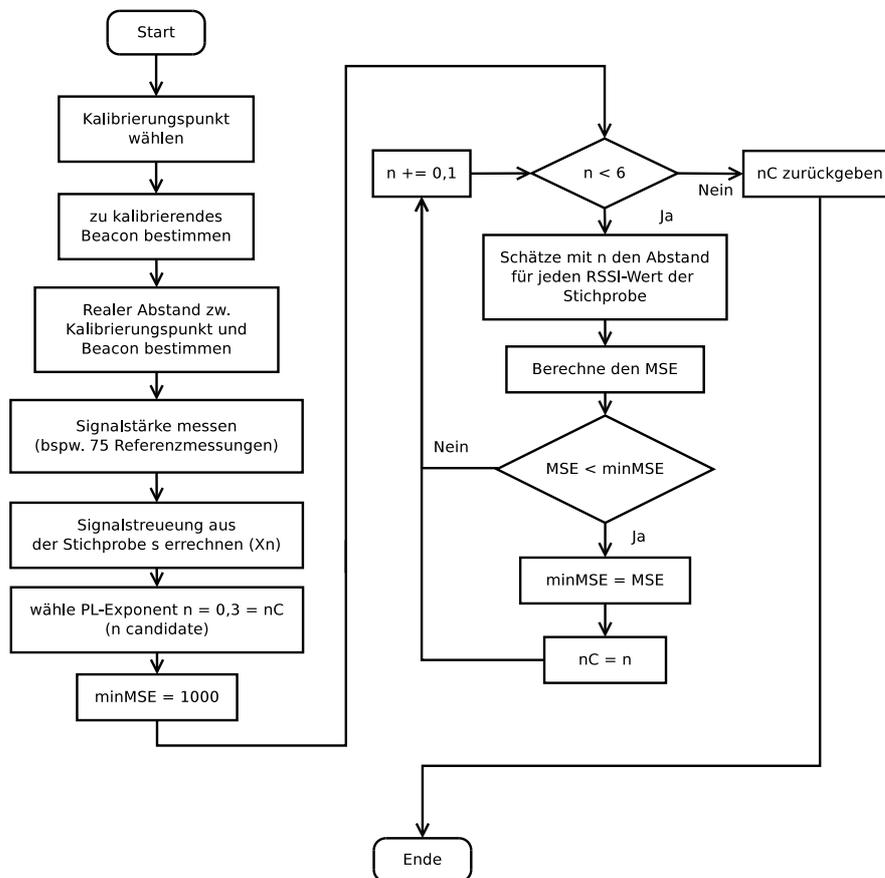


Abbildung D.2: Vorgehensweise bei der Punktkalibrierung.

```

1 +(NSArray*) getBinomCombinationsNChooseThreeWithN:(int) n{
2     NSMutableArray *subsets = [[NSMutableArray alloc] init];
3     int k = 3;
4     for (int i = 1; i <= n-(k-1); i++) {
5         for (int j = i+1; j < n; j++) {
6             for (int l = j+1; l < n+1; l++) {
7
8                 NSArray *subset = [NSArray arrayWithObjects:[NSNumber
9                     numberWithInt:i], [NSNumber numberWithInt:j], [NSNumber
10                        numberWithInt:l], nil];
11                 [subsets addObject:subset];
12             }
13         }
14     }
15     return [NSArray arrayWithArray:subsets];
16 }
    
```

Listing D.1: Funktion zum Ermitteln der $\binom{n}{3}$ Kombinationen.

D.1 Ergebnisse

Kategorie	Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Mittlerer Fehler (m)	Differenz
sehr gut	3	-8	Kein	Mitte	-	0,3	0,4
	6	+4	Strong	Mitte	Multilateration	0,7	0,0
	4	-8	Strong	Mitte	Multilateration	0,7	0,0
	4	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7	0,0
	6	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	0,7	0,0
	6	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7	0,0
	6	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	0,7	0,0
	5	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,8	0,0
	5	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	0,8	0,0
	5	-8	Kein	Mitte	Multilateration	0,9	0,1
gut	6	+4	Kein	Mitte	Multilateration	0,9	0,0
	6	+4	Strong	Mitte	Multilateration	0,9	0,1
	6	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,0	0,0
	6	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,0	0,0
	6	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	1,1	0,1
	6	-8	Strong	Mitte	Multilateration	1,2	0,2
	4	+4	Strong	Mitte	Multilateration	1,3	0,1
	4	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4	0,1
	6	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4	0,0
	6	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,5	0,1
befriedigend	4	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	1,6	0,0
	6	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	1,6	0,1
	4	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,6	0,0
	4	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	2,0	0,3
	4	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	2,0	0,0
ausreichend	5	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	2,0	0,0
	4	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,1	0,0
	5	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	2,4	0,3
	4	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,5	0,1
	6	-8	Kein	Mitte	Multilateration	2,5	0,1
	4	-8	Kein	Mitte	Multilateration	2,6	0,0
ungenügend	6	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,7	0,1
	6	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,1	0,4
	6	-8	Reliable	Rand	Multilateration	3,1	0,1
	4	+4	Kein	Mitte	Multilateration	3,2	0,1
	6	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,4	0,1
	5	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,4	0,0
	6	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	3,4	0,1
	5	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,4	0,0
	5	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	3,4	0,0
	5	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,5	0,1

Abbildung D.3: Ergebnisse der Positionsschätzungen - Seite 1.

Kategorie	Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Mittlerer Fehler (m)	Differenz
ungenügend	5	-8	Reliable	Rand	Multilateration	3,5	0,0
	5	-8	Kein	Rand	Multilateration	3,6	0,1
	6	+4	Strong	Rand	Multilateration	3,6	0,1
	6	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,7	0,1
	6	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,8	0,1
	6	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,8	0,0
	3	-8	Kein	Rand	-	3,8	0,0
	6	+4	Reliable	Rand	Multilateration	4,0	0,1
	6	-8	Kein	Rand	Multilateration	4,0	0,0
	4	-8	Strong	Rand	Multilateration	4,0	0,0
	6	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	4,1	0,1
	4	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	4,1	0,0
	6	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	4,2	0,0
	5	+4	Strong	Mitte	Multilateration	4,3	0,1
	5	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	4,7	0,4
	5	+4	Strong	Rand	Multilateration	5,0	0,3
	5	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	5,3	0,3
	4	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	5,4	0,1
	5	+4	Reliable	Rand	Multilateration	5,5	0,2
	4	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	6,1	0,6
	4	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	6,1	0,0
	4	-8	Kein	Rand	Multilateration	6,3	0,2
	4	+4	Strong	Rand	Multilateration	6,4	0,1
	4	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	6,4	0,0
	5	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	7,1	0,7
	4	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	7,5	0,4
	4	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	7,5	0,0
	4	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	11,0	3,5
	3	+4	Kein	Rand	-	12,5	1,5
	5	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	13,6	1,1
3	+4	Kein	Mitte	-	14,0	0,4	
4	+4	Kein	Rand	Multilateration	15,0	1,0	
5	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	15,6	0,6	
5	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	15,8	0,1	
5	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	19,8	4,0	

Abbildung D.4: Ergebnisse der Positionsschätzungen - Seite 2.

Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Mittlerer Fehler (m)
3	-8	Kein	Mitte	-	0,3
3	-8	Kein	Rand	-	3,8
3	+4	Kein	Mitte	-	14,0
3	+4	Kein	Rand	-	12,5
4	-8	Kein	Mitte	Multilateration	2,6
4	-8	Strong	Mitte	Multilateration	0,7
4	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	2,0
4	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,1
4	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
4	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	2,0
4	-8	Kein	Rand	Multilateration	6,3
4	-8	Strong	Rand	Multilateration	4,0
4	-8	Reliable	Rand	Multilateration	7,5
4	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	5,4
4	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	4,1
4	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	7,5
4	+4	Kein	Mitte	Multilateration	3,2
4	+4	Strong	Mitte	Multilateration	1,3
4	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	1,6
4	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,5
4	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4
4	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,6
4	+4	Kein	Rand	Multilateration	15,0
4	+4	Strong	Rand	Multilateration	6,4
4	+4	Reliable	Rand	Multilateration	6,1
4	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	11,0
4	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	6,4
4	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	6,1
5	-8	Kein	Mitte	Multilateration	0,9
5	-8	Strong	Mitte	Multilateration	0,9
5	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	1,0
5	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	0,8
5	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,8
5	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,0
5	-8	Kein	Rand	Multilateration	3,6
5	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,4
5	-8	Reliable	Rand	Multilateration	3,5
5	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,4
5	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,5
5	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	3,5
5	+4	Kein	Mitte	Multilateration	15,6

Abbildung D.5: Ergebnisse der Filtervergleiche - Seite 1.

Beaconanzahl	Sendeleistung (dBm)	Filter	Positionen	Berechnungsart	Mittlerer Fehler (m)
5	+4	Strong	Mitte	Multilateration	4,3
5	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	2,0
5	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	13,6
5	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	4,7
5	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	2,4
5	+4	Kein	Rand	Multilateration	15,8
5	+4	Strong	Rand	Multilateration	5,0
5	+4	Reliable	Rand	Multilateration	5,5
5	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	19,8
5	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	5,3
5	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	7,1
6	-8	Kein	Mitte	Multilateration	2,5
6	-8	Strong	Mitte	Multilateration	1,2
6	-8	Reliable	Mitte	Multilateration	1,6
6	-8	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	2,7
6	-8	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	1,4
6	-8	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	1,5
6	-8	Kein	Rand	Multilateration	4,0
6	-8	Strong	Rand	Multilateration	3,1
6	-8	Reliable	Rand	Multilateration	3,1
6	-8	Kein	Rand	Multiple Trilateration	4,1
6	-8	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,4
6	-8	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	3,4
6	+4	Kein	Mitte	Multilateration	0,9
6	+4	Strong	Mitte	Multilateration	0,7
6	+4	Reliable	Mitte	Multilateration	0,7
6	+4	Kein	Mitte	Multiple Trilateration	1,1
6	+4	Strong	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
6	+4	Reliable	Mitte	Multiple Trilateration	0,7
6	+4	Kein	Rand	Multilateration	3,8
6	+4	Strong	Rand	Multilateration	3,6
6	+4	Reliable	Rand	Multilateration	4,0
6	+4	Kein	Rand	Multiple Trilateration	3,7
6	+4	Strong	Rand	Multiple Trilateration	3,8
6	+4	Reliable	Rand	Multiple Trilateration	4,2

Abbildung D.6: Ergebnisse der Filtervergleiche - Seite 2.

Abkürzungsverzeichnis

AOA	Angle-of-Arrival
dBm	Dezibel Milliwatt
BLE	Bluetooth Low Energy
GPS	Global Positioning System
IQR	Interquartile Range, Interquartilsabstand
LBS	Location-Based-Services
LOS	Line of Sight, Sichtkontakt
MSE	Mean Square Error, mittlerer quadratischer Fehler
NLOS	Non Line of Sight, kein Sichtkontakt, keine Sichtverbindung
POI	Points of Interest, Sehenswürdigkeiten, interessanter Ort in der näheren Umgebung
RSSI	Received Signal Strength Indikator, empfangene Signalstärke in dBm
SDK	Software Development Kit
SEM	Standard Error of The Mean, Standardfehler
TOA	Time-of-Arrival
TDOA	Time-Difference-of-Arrival
UUID	Universally Unique Identifier

Literaturverzeichnis

- [ABCC11] APPLGATE, David L. ; BIXBY, Robert E. ; CHVÁTAL, Vasek ; COOK, William J.: *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study: A Computational Study*. Princeton University Press, 2011. – ISBN 1400841100
- [App14a] APPLE INC.: *Getting Started with iBeacon*. Version: Juni 2014. <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>, Abruf: 08.11.2014
- [App14b] APPLE INC.: *iOS 5.0*. Version: Oktober 2014. <https://developer.apple.com/library/ios/releasenotes/General/WhatsNewIniOS/Articles/iOS5.html>, Abruf: 28.02.2015. – Dokumentation
- [App15] APPLE INC.: *Core Location Framework Reference*. Version: März 2015. https://developer.apple.com/library/ios/documentation/CoreLocation/Reference/CoreLocation_Framework/index.html, Abruf: 01.03.2015. – Dokumentation
- [BA02] BLAUNSTEIN, Nathan ; ANDERSEN, J. B.: *Multipath Phenomena in Cellular Networks*. Version: 2002. <https://books.google.de/books?id=Y-L3N0kYGSIC&printsec=frontcover&dq=multipath&hl=de&sa=X&ei=1SQDVYKqG8zZPd6ngagK&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=multipath&f=false>, Abruf: 08.05.2015. ISBN 9781580531856
- [Bew11] BEWERSDORFF, Jörg: *Statistik - wie und warum sie funktioniert: Ein mathematisches Lesebuch*. 1. Vieweg+Teubner Verlag, 2011. – ISBN 978-3-8348-8264-6
- [Blu10] BLUETOOTH SIG (Hrsg.): *Specification of The Bluetooth System - Covered Core Package Version: 4.0*. Version: Juni 2010. https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=229737, Abruf: 24.01.2015
- [Blu15a] BLUETOOTH SIG: *Bluetooth Smart (Low Energy) Technology*. Version: Februar 2015. <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/BLE.aspx>, Abruf: 26.02.2015
- [Blu15b] BLUETOOTH SIG: *Generic Attribute Profile (GATT)*. Version: Februar 2015. <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/GATT.aspx>, Abruf: 27.02.2015

- [Blu15c] BLUETOOTH SIG: *History of the Bluetooth Special Interest Group*. Version: März 2015. <http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-Bluetooth.aspx>, Abruf: 02.03.2015
- [Blu15d] BLUETOOTH SIG: *Host Controller Interface (HCI) Architecture*. Version: Februar 2015. <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/HCI.aspx>, Abruf: 27.02.2015
- [Blu15e] BLUETOOTH SIG: *The Low Energy Technology Behind Bluetooth Smart*. Version: Februar 2015. <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx>, Abruf: 26.02.2015
- [Blu15f] BLUETOOTH SIG: *Technical Considerations for Bluetooth Low Energy Application Developers*. Version: Februar 2015. <https://developer.bluetooth.org/DevelopmentResources/Pages/Bluetooth-Smart-Optimizations.aspx>, Abruf: 26.02.2015
- [Blu15g] BLUETOOTH SIG: *Welcome to Bluetooth Technology 101 A brief tutorial on Bluetooth wireless technology*. Version: Februar 2015. <http://www.bluetooth.com/Pages/Fast-Facts.aspx>, Abruf: 26.02.2015
- [BMF15] BMFD: *Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Forschung - BMBF*. Version: 2015. <http://www.bmbf.de/de/9072.php>, Abruf: 25.02.2015
- [Bor14] BOROWICZ, Wojtek: *Preserve Battery life of your Beacons*. Version: Dezember 2014. <http://community.estimote.com/hc/en-us/articles/202027323-Preserve-Battery-life-of-your-Beacons>, Abruf: 24.03.2015
- [BP00] BAHL, P. ; PADMANABHAN, V.N.: *RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system*, IEEE, 2000. – ISBN 0-7803-5880-5, 775-784
- [Cis14] CISCO SYSTEMS INC. (Hrsg.): *iBeacon - FAQ*. Version: 2014. http://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/connected-mobile-experiences/ibeacon_faq.pdf, Abruf: 06.05.2015
- [Dör03] DÖRFLER, Nikolas: *Hidden Markov Models*. Version: November 2003. http://campar.in.tum.de/twiki/pub/Far/MachineLearningWiSe2003/doerfler_ausarbeitung.pdf, Abruf: 29.04.2015
- [DS12] DETLEFSEN, Jürgen ; SIART, Uwe: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik von Detlefsen, Jürgen (2012) Taschenbuch*. Auflage: aktualisierte Auflage. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012. – ISBN 978-3-486-70891-2
- [est14a] *Estimote Indoor Location*. Version: September 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=wtBERi7Lf3c>, Abruf: 14.02.2015
- [Est14b] ESTIMOTE INC.: *Estimote*. Version: November 2014. <http://estimote.com>, Abruf: 03.11.2014

- [Est15a] ESTIMOTE INC.: *Estimote Indoor Location*. Version: März 2015. <http://estimote.com/indoor>, Abruf: 04.03.2015
- [Est15b] ESTIMOTE INC.: *Estimote Indoor Location SDK Reference*. Version: März 2015. <https://estimote.github.io/iOS-Indoor-SDK/>, Abruf: 04.03.2015
- [Far12] FARAGHER, Ramsey: *Understanding the Basis of the Kalman Filter Via a Simple and Intuitive Derivation*. Version: September 2012. <https://www.cl.cam.ac.uk/~rmf25/papers/Understanding%20the%20Basis%20of%20the%20Kalman%20Filter.pdf>, Abruf: 08.05.2015
- [Goo15] GOOGLE INC.: *Bluetooth Low Energy*. Version: Februar 2015. <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-le.html>, Abruf: 28.02.2015. – Dokumentation
- [Güt14] GÜTTER, Dr. rer. nat. D.: *Ausbreitung elektromagnetischer Wellen*. Version: November 2014. http://www.guetter-web.de/education/rnp/rnp_4.pdf, Abruf: 11.03.2015
- [GYZ02] GUTIN, Gregory ; YEO, Anders ; ZVEROVICH, Alexey: *Traveling salesman should not be greedy: domination analysis of greedy-type heuristics for the {TSP}*. Version: 2002. [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X\(01\)00195-0](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X(01)00195-0), Abruf: 08.05.2015. – 81 – 86 S.. – DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X\(01\)00195-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-218X(01)00195-0). ISSN 0166-218X
- [Ham11] HAMEED, Samir M.: *Indoor Propagation Modeling for Wireless Local Area Network (WLAN)*. Version: Januar 2011. <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=46029>, Abruf: 14.02.2015. – 9 S.
- [HCL09] HAN, Guangjie ; CHOI, Deokjai ; LIM, Wontaek: *Reference node placement and selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks*. Version: August 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.651>, Abruf: 25.04.2015. – 1017-1027 S.. – DOI 10.1002/wcm.651. ISSN 1530-8677
- [HH14] HEYDON, Robin ; HUNN, Nick ; BLUETOOTH SIG (Hrsg.): *Bluetooth Low Energy*. Version: Dezember 2014. https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=227336, Abruf: 01.12.2014
- [HWJT10] HANSEN, R. ; WIND, R. ; JENSEN, Christian S. ; THOMSEN, B.: *Algorithmic strategies for adapting to environmental changes in 802.11 location fingerprinting*. Version: September 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/IPIN.2010.5648270>, Abruf: 08.05.2015. – 1-10 S.. – DOI 10.1109/IPIN.2010.5648270
- [IH04] IBACH, Peter ; HÜBNER, Tobias: *Magic Map - Kooperative Positionsbestimmung über WLAN*. Version: April 2004. http://www2.informatik.hu-berlin.de/~ibach/CCC_Ibach_Huebner_Schweigert.pdf, Abruf: 08.05.2015. – 8 S.

- [Inc15] INC., Estimote: *Introducing the Estimote Indoor Location SDK, the next level of context for mobile apps.* Version: März 2015. <http://blog.estimote.com/post/98316374485/introducing-the-estimote-indoor-location-sdk-the>, Abruf: 04.03.2015
- [ind14] INDOORS GMBH: *San Francisco International Airport | Accurate real-time Indoor Localization.* Version: Oktober 2014. <http://indoo.rs/sfo/>, Abruf: 28.10.2014
- [ISWL05] IBACH, Peter ; STANTCHEV, Vladimir ; WEISS, Andreas ; LEDERER, Florian: *WLAN-based asset tracking for warehouse management.* Version: Dezember 2005. <https://www2.informatik.hu-berlin.de/~ibach/Position%20Sensing%20in%20SCM.pdf>, Abruf: 08.05.2015. – 8 S.
- [IT-15a] IT-WISSEN.INFO: *TDOA (time difference of arrival).* Version: Februar 2015. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/TDOA-time-difference-of-arrival.html>, Abruf: 25.05.2015. – Online-Lexikon
- [IT-15b] IT-WISSEN.INFO: *TOA (time of arrival).* Version: Februar 2015. <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/TOA-time-of-arrival.html>, Abruf: 25.02.2015. – Online-Lexikon
- [KKH+06] KING, Thomas ; KOPF, Stephan ; HAENSELMANN, Thomas ; LUBBERGER, Christian ; EFFELSBURG, Wolfgang: *COMPASS: A Probabilistic Indoor Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses.* Version: Juni 2006. <https://ub-madoc.bib.uni-mannheim.de/1276>, Abruf: 08.05.2015. – Arbeitsspapier
- [KL11] KAGERMANN, Henning ; LUKAS, Wolf-Dieter: *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution.* Version: April 2011. <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>, Abruf: 25.02.2015
- [Kos08] KOSCHAK, Janka: *Standardabweichung und Standardfehler: Der kleine, aber feine Unterschied.* Version: 2008. <http://dx.doi.org/10.1055/s-2008-1073146>, Abruf: 08.05.2015. – DOI 10.1055/s-2008-1073146
- [Lin65] LIN, Shen: *Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem.* Version: Dezember 1965. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1965.tb04146.x>, Abruf: 08.05.2015. – 2245–2269 S.. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1965.tb04146.x. ISSN 1538-7305
- [MB12] MÖLLER, Klaus ; BUNKERT, Stefanie: *Optimierung der Leistungsfähigkeit manueller Kommissionierungssysteme.* Version: Januar 2012. <http://www.hs-pforzheim.de/de-de/hochschule/einrichtungen/>

- iaf/veroeffentlichungen/forschungsberichte/documents/pf_fb_11_rokoko_v1.pdf, Abruf: 08.05.2015. – Forschungsbericht
- [MJ07] MURPHY JR., William S.: *DETERMINATION OF A POSITION USING APPROXIMATE DISTANCES AND TRILATERATION*. Version: Juli 2007. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.217.4514&rep=rep1&type=pdf>, Abruf: 08.05.2015
- [nev14] NEVAN.NET: *Core Location Manager Changes in iOS 8*. Version: Dezember 2014. <http://nevan.net/2014/09/core-location-manager-changes-in-ios-8/>, Abruf: 10.12.2014
- [PCL⁺10] PEI, Ling ; CHEN, Ruizhi ; LIU, Jingbin ; KUUSNIEMI, Heidi ; TENHUNEN, Tomi ; CHEN, Yuwei: *Using Inquiry-based Bluetooth RSSI Probability Distributions for Indoor Positioning*. Version: 2010. <http://dx.doi.org/10.5081/jgps.9.2.122>, Abruf: 08.05.2015 (9). – 9 S.. – DOI 10.5081/jgps.9.2.122
- [Poo15] POOLE, Ian: *Radio Signal Path Loss*. Version: 2015. <http://www.radio-electronics.com/info/propagation/path-loss/rf-signal-loss-tutorial.php>, Abruf: 06.05.2015
- [Puc14] PUCHTA, Ola: *Broadcasting Power, RSSI and Measured Power explained*. Version: Oktober 2014. <http://community.estimote.com/hc/en-us/articles/201636913-Broadcasting-Power-RSSI-and-Measured-Power-explained>, Abruf: 10.11.2014
- [Quo15] QUORA.COM: *What is the positioning accuracy of iBeacon (and other BLE) technology?* Version: März 2015. <https://www.quora.com/What-is-the-positioning-accuracy-of-iBeacon-and-other-BLE-technology>, Abruf: 02.03.2015
- [QZX⁺12] QIU, Tie ; ZHOU, Yu ; XIA, Feng ; JIN, Naigao ; FENG, Lin: *A localization strategy based on n-times trilateral centroid with weight*. Version: 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/dac.2332>, Abruf: 08.05.2015. – 1160–1177 S.. – DOI 10.1002/dac.2332. ISSN 1099–1131
- [RE09] RODAS, Javier ; ESCUDERO, Carlos J.: *Joint Estimation of Position and Channel Propagation Model Parameters in a Bluetooth Network*. Version: Juni 2009. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/5207959/5207960/05207993.pdf?arnumber=5207993>, Abruf: 08.05.2015
- [Rei94] REINELT, Gerhard: *The Traveling Salesman*. Version: 1994. <http://link.springer.com/10.1007/3-540-48661-5>, Abruf: 09.03.2015 ISBN 978–3–540–58334–9

- [Sal14] SALAS, Agustí C.: *Indoor Positioning System based on Bluetooth Low Energy*. Version: Juni 2014. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/22364>, Abruf: 08.05.2015
- [Sta15] STACKOVERFLOW.COM: *Triangulate example for iBeacons*. Version: März 2015. <https://stackoverflow.com/questions/20332856/triangulate-example-for-ibeacons>, Abruf: 02.03.2015
- [Ste14] STECZKIEWICZ, Agnieszka: *Which devices are compatible with Estimote Beacons?* Version: Dezember 2014. <http://community.estimote.com/hc/en-us/articles/201027523-Which-devices-are-compatible-with-Estimote-Beacons->, Abruf: 03.03.2015
- [Vis13] VISWANATHAN, Mathuranathan: *Log Distance Path Loss or Log Normal Shadowing Model*. Version: September 2013. <http://www.gaussianwaves.com/2013/09/log-distance-path-loss-or-log-normal-shadowing-model/>, Abruf: 02.05.2015
- [War14] WARSKI, Adam: *How do iBeacons work*. Version: Januar 2014. <http://www.warski.org/blog/2014/01/how-ibeacons-work/>, Abruf: 28.02.2015
- [Woo13] WOOLLEY, Martin: *BlackBerry 10 - Bluetooth LE primer for developers*. Version: April 2013. <https://supportforums.blackberry.com/t5/Native-Development-Knowledge/BlackBerry-10-Bluetooth-LE-primer-for-developers/ta-p/2287377>, Abruf: 26.02.2015. – Forum
- [YA05] YOUSSEF, Moustafa ; AGRAWALA, Ashok: *The Horus WLAN location determination system*. Version: 2005. <http://dx.doi.org/10.1145/1067170.1067193>, Abruf: 08.05.2015. – 205 S. – DOI 10.1145/1067170.1067193. ISBN 1931971315
- [ZL09] ZHU, Ju-fang ; LI, Qing-yuan: *Solving the Travelling Salesman Problem by the Program of Ant Colony Algorithm*. Version: Dezember 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/CISE.2009.5366235>, Abruf: 08.05.2015. – 1–3 S. – DOI 10.1109/CISE.2009.5366235. ISBN 978–1–4244–4507–3
- [ZP06] ZHOU, Sheng ; POLLARD, J.K.: *Position Measurement using Bluetooth*. Version: Mai 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/TCE.2006.1649679>, Abruf: 08.05.2015. – 555–558 S.. – DOI 10.1109/TCE.2006.1649679. ISSN 0098–3063