

Universität Stuttgart

Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik

Diplomarbeit Nr. 3449

**Kooperative Positionierung
von Smartphones**

Sanda Leko

Studiengang:	Informatik
Prüfer:	Prof. Dr. Kurt Rothermel
Betreuer:	M.Sc. Patrick Baier
begonnen am:	01.02.2013
beendet am:	02.08.2013
CR-Nummer:	C.2.4, H.3.0



Institut für Parallele
und Verteilte Systeme
Abteilung Verteilte Systeme
Universitätsstraße 38
D-70569 Stuttgart

Zusammenfassung

Kontextsensitive und ortsbezogene Anwendungen spielen in der heutigen mobilisierten Welt eine bedeutende Rolle. Während die Positionierung mobiler Geräte in Außenbereichen mit GPS hohe Genauigkeiten erreicht, existiert für Innenbereiche bisher kein einheitlicher Standard, mit dem ein Smartphone seine Position festlegen kann. Die aktuelle Forschung zeigt jedoch, dass dies mit modernen Smartphones und verschiedenen Infrastrukturen bewältigt werden kann. Eine Möglichkeit der Innenraumpositionierung bietet die Fingerprinting-Methode. Fingerprinting erfordert allerdings eine zeitaufwändige Sammlung von Daten in der Offline-Phase. Inertialnaviationsverfahren sind eine weitere Möglichkeit für die Positionierung in Innenbereichen. Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch die Angabe einer Startposition sowie die Notwendigkeit einer Synchronisierung.

In dieser Diplomarbeit wird ein kooperatives Innenraumpositionierungssystem mit Smartphones entworfen und implementiert. Die Positionierung eines Smartphones erfolgt mittels der Lateration. Dazu werden die Positionsangaben sowie die Distanz zu seinen Wi-Fi Direct Kommunikationspartnern benötigt. Die Signalstärke einer Wi-Fi Direct Verbindung kann als ein Indikator für die Distanz zwischen zwei verbundenen Geräten verstanden werden. Aus diesem Grund wird sie in dem hier entwickelten Positionierungssystem zusammen mit einem Propagierungsmodell genutzt, um die Distanz zwischen zwei Smartphones zu berechnen. Die Positionierung mittels der Lateration wird zudem durch verschiedene kooperative Algorithmen optimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass durch diese Optimierungen eine genauere Distanzberechnung sowie eine robuste Positionierung in Gebäuden erreicht werden kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Einleitung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Gliederung der Diplomarbeit	4
2	Grundlagen	7
2.1	Funktechnologien und Funksignale	7
2.1.1	Funktechnologien	7
2.1.2	Funksignale	8
2.2	Positionierungsmethoden in Innenbereichen	9
2.3	Propagierungsmodelle der Funksignale	11
2.3.1	Freiraumdämpfung	12
2.3.2	Propagierungsmodelle in Innenbereichen	13
2.3.2.1	<i>ITU Path Loss Model</i>	13
2.3.2.2	<i>Log-Distance Path Loss Model</i>	13
2.3.2.3	<i>Attenuation Factor Model</i>	14
2.4	Mathematische Grundlagen	14
2.4.1	Lateration	14
2.4.2	Methode der kleinsten Quadrate	16
2.4.3	Gauß-Newton-Verfahren	18
2.5	Verwandte Arbeiten	19
2.6	Ansatz	21
3	Kooperative Positionierung von Smartphones	23

3.1	Systemaufbau	23
3.1.1	Gebäude	23
3.1.2	Smartphones	24
3.1.3	Datenbank	25
3.1.4	Systeminfrastruktur	25
3.2	Konzept	26
3.2.1	Auswahl des Propagierungsmodells und Trainingsphase	27
3.2.2	Positionierungsphase	28
3.2.3	Visualisierung	34
3.3	Umsetzung	34
3.3.1	Auswahl des Propagierungsmodells und Trainingsphase	34
3.3.1.1	Auswahl des Propagierungsmodells	34
3.3.1.2	Trainingsphase	36
3.3.1.3	Visualisierung	50
3.3.2	Positionierungsphase	51
3.3.2.1	Aufbau einer Funkverbindung zwischen den Smartphones	51
3.3.2.2	Nachrichtenaustausch	52
3.3.2.3	Berechnung der Distanzen	52
3.3.2.4	Berechnung der Position	52
3.3.2.5	Visualisierung	69
4	Evaluierung	71
4.1	Evaluierungsverfahren	71
4.2	Bestimmung der unbekannt Parameter des Propagierungsmodells	73
4.3	Ergebnisse	76
4.3.1	Distanzberechnung	76
4.3.2	Kooperative Positionierung	78
4.3.2.1	Ergebnisse des nicht optimierten und optimierten Positionierungsverfahrens	79
4.3.2.2	Detaillierte Analyse zweier Szenarien	82
5	Zusammenfassung und Ausblick	95

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lateration mit einem Referenzpunkt. Die gesuchte Position ist auf der Kreislinie, es aber ist keine eindeutigere Aussage möglich, da die Richtung unbekannt bleibt.	15
2.2	Lateration mit zwei Referenzpunkten. Kreise schneiden sich in zwei Punkten, daher kann nicht gesagt werden, welcher der Schnittpunkte die gesuchte Position darstellt.	15
2.3	Lateration mit drei Referenzpunkten. Drei Kreise schneiden sich in einem Punkt und dieser Schnittpunkt ist die gesuchte Position.	16
3.1	Informatik Gebäude - zweites Obergeschoss	24
3.2	Systeminfrastruktur	26
3.3	Phasen des kooperativen Positionierungssystems	27
3.4	Ablauf der Trainingsphase des kooperativen Positionierungssystems	28
3.5	Ablauf der Positionierungsphase des kooperativen Positionierungssystems .	29
3.6	Lateration mit mit einem Sender und einem Empfänger	30
3.7	Lateration mit zwei Sendern und einem Empfänger - Positionierung auf den Schnittpunkten	31
3.8	Lateration mit zwei Sendern und einem Empfänger - Positionierung im Mittelpunkt der Schnittfläche	32
3.9	Trilateration - Positionierung im Schnittpunkt	33
3.10	Trilateration - Positionierung auf den Schnittpunkten	33
3.11	Wi-Fi Direct Signalstärken in einem Messpunkt	37
3.12	Aufnahmepositionen in der Testumgebung - LOS-Szenario	38
3.13	Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 1	39
3.14	Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 2	39
3.15	Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 3	40

3.16	Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 4	40
3.17	Aufnahmepositionen in der Testumgebung - NLOS-Szenario	41
3.18	Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 1	42
3.19	Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 2	42
3.20	Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 3	43
3.21	Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 4	43
3.22	Wi-Fi Direct Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung	45
3.23	Mittelwert der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen	46
3.24	Maximum der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen	46
3.25	Median der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen	47
3.26	Datenbankschema: Jedem Messpunkt wird eine eindeutige ID zugeteilt. Unter dieser werden die MAC-Adresse als Identifikation des Senders, die Position des Senders im Gebäude, der vorgegebene Abstand und die Signalstärke gespeichert.	48
3.27	Trilateration mit fehlerhaften Distanzberechnungen. Je zwei Kreise schneiden sich. Alle Distanzen sind etwas zu groß abgeschätzt. Die echte Position passt jedoch zu allen Vorgaben recht gut.	54
3.28	Trilateration mit fehlerhaften Distanzberechnungen. Je zwei Kreise schneiden sich. Die echte Position passt nur zu der Vorgabe eines Senders einigermaßen.	54
3.29	Verwendete Distanzen in der Fehlerfunktion. Sowohl die anhand des Propagierungsmodells berechneten Distanzen als auch die Distanzen zwischen einem betrachteten Punkt und den Koordinaten der Sender fließen in die Fehlerfunktion ein. Die berechneten Distanzen sind durch durchgezogene Linien dargestellt, während gestrichelte Linien die Distanzen zwischen dem Beispielpunkt und den Sendern visualisiert.	55
3.30	Fehler außerhalb und innerhalb eines Kreises. Punkte auf der Kreislinie weisen keinen Fehler auf. Die gestrichelten Linien zeigen die Richtungen des Anstiegs. Der Verlauf der Fehlerfunktion ist punktsymmetrisch zur Position des Senders.	56
3.31	Verlauf der einzelnen Fehlerfunktionen von drei Sendern sowie der Summe dieser Fehlerfunktionen. Die Summe einzelner Fehlerfunktionen der Sender bestimmt den Verlauf der gesamten Fehlerfunktion $F(x, y)$	57
3.32	Ablauf der Positionierung in drei Schritten	58
3.33	Iterationen des Gauss-Newton-Verfahrens mit drei Sendern und einem Empfänger	61

3.34	Visualisierung der Distanzen zwischen je zwei Sendern sowie die Distanzen der jeweiligen Sender zum Empfänger zur Optimierung der Positionsberechnung. Der mit einem Punkt markierte Empfänger überprüft die potentiell fehlerhaften Werte auf Konsistenz.	64
3.35	Dreieck zwischen Empfänger und zwei Sendern	64
3.36	Beeinflussung der Positionsberechnung durch eine überabgeschätzte Distanz zum Sender. Die Distanzen wurden, ausgenommen vom großen Kreis, nahezu perfekt berechnet bzw. mit dem ersten Ansatz optimiert. Die Positionierung wird jedoch vom großen fehlerhaften Kreis beeinflusst.	65
3.37	Normaler Funktionsverlauf und gewichteter Funktionsverlauf. Positionen innerhalb der vorgegebenen Distanz erzeugen einen kleineren Fehler als Positionen außerhalb.	66
3.38	Spezialfall bei der Aufstellung der Kreise. Die zwei großen Kreise schneiden sich in zwei Punkten die deutlich außerhalb des kleinen Kreises liegen. Der Sender mit der kleinsten Distanz widerlegt die beiden Lösungen, welche die anderen Sender anstreben.	67
3.39	Angepasste Ausgangssituation für das Gauß-Newton-Verfahren nach der Optimierung. Alle drei Kreise schneiden sich in einem Punkt.	69
4.1	Aufnahmepositionen der Wi-Fi Direct Signalstärken in der Testumgebung zur Bestimmung der unbekannt Parameter des ausgewählten Propagierungsmodells	74
4.2	Berechnete Signalstärken nach dem ausgewählten Propagierungsmodell. Die freien Parameter betragen $P_0 = 26,0$ und $n = 43$ für das erweiterte Modell sowie $P_0 = -1,36$ für das einfache Modell.	74
4.3	Mittlerer Fehler des erweiterten und einfachen Propagierungsmodells . . .	75
4.4	Mittlerer und maximaler Fehler der Distanzberechnung	76
4.5	Prozentuale Fehlerobergrenzen der Distanzberechnung	77
4.6	Mittlerer Fehler bei dem nicht optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung	79
4.7	Maximaler Fehler bei dem nicht optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung	80
4.8	Mittlerer Fehler bei dem optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung	81
4.9	Maximaler Fehler bei dem optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung	81
4.10	Prozentuale Fehlerobergrenzen der Positionierung	82

4.11 Fehler der Distanzberechnung - erstes Szenario	84
4.12 Fehler der Distanzberechnung - zweites Szenario	84
4.13 Fehler der Positionierung - erstes Szenario mit der realen Position und dem Schnittpunkt der zwei kleinsten Kreise als Startpunkt für das Gauß-Newton-Verfahren	85
4.14 Fehler der Positionierung - zweites Szenario mit der realen Position und dem Schnittpunkt der zwei kleinsten Kreise als Startpunkte für das Gauß-Newton-Verfahren	86
4.15 Mittlerer Fehler bei der Positionierung mit variierender Anzahl der Sender - erstes Szenario	87
4.16 Mittlerer Fehler bei der Positionierung mit variierender Anzahl der Sender - zweites Szenario	87
4.17 Positionierung mit Verfahren A. Zwei der Sender haben durch zu kleine Signalstärken die Distanz deutlich zu groß geschätzt. Es gibt keinen Punkt, der zu allen drei Kreisen passt. Die beiden Sender mit großen Distanzwerten schieben das Minimum der Gesamtfehlerfunktion nach außen.	89
4.18 Positionierung mit Verfahren B. Durch Maximumbildung mehrerer Signalwerte kann der untere Sender seine ermittelte Distanz selbst korrigieren.	90
4.19 Positionierung mit Verfahren C. Die geometrische Beziehung zwischen den oberen beiden Sendern passt nicht zu den ermittelten Distanzen. Die geforderte Distanz des oberen Senders verletzt die Dreiecksungleichung des Dreiecks aus den beiden Sendern und dem Empfänger. Dem mittleren Sender wird mehr Gewicht verliehen, da hohe Signalwerte auch theoretisch nur in der Nähe von Sendern gemessen werden können. Die Aussage des oberen Senders wird korrigiert. Es gibt aber nach wie vor keinen Punkt, der auf allen drei Kreisen liegt. Der Lösungspunkt ist ein Kompromiss aus den drei Aussagen.	91
4.20 Positionierung mit Verfahren D. Aufgrund der Annahme, dass Distanzen eher überabgeschätzt werden, wird der Fehler einer Position innerhalb des Kreises geringer gewichtet als der Fehler außerhalb des Kreises. Dadurch kann der Kompromiss aus drei widersprüchlichen Aussagen innerhalb der abgeschätzten Distanzen freier bewegt werden. Dem mittleren Sender mit der kürzesten Distanz wird dadurch mehr Gewicht verliehen.	92

-
- 4.21 Positionierung mit Verfahren E. Der mittlere Sender mit der kürzesten Distanz erkennt, dass die beiden anderen Sender zwei gemeinsame Lösungen anstreben, die nicht zu seiner Aussage passen. Erneut wird unter der Annahme, dass kurze Distanzen nur in der Nähe von Sendern gemessen werden können und damit mit höherer Wahrscheinlichkeit korrekt sind, die Aussage des mittleren Senders genommen, um die anderen Aussagen zu korrigieren. Der mittlere Sender berechnet die Differenz zwischen seiner Aussage und des nächsten Schnittpunkts der anderen beiden Kreise und zieht diese von den Distanzen der anderen Kreise ab. 93

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung

Die Verbreitung von mobilen Geräten wie Notebooks, Smartphones oder eigenständigen *Global Positioning Systems* (GPS) basierten Geräten haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass standortbezogene Anwendungen oder *Location Based Services* (LBS) immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Navigationssysteme werden beispielsweise in Autos für die Bestimmung der Fahrroute verwendet. Diese Systeme basieren auf der GPS-Technologie, welche sich für die Positionierung in Außenbereichen bereits fest etabliert hat. Alle Geräte, die einen GPS-Sensor besitzen, sind in der Lage, ihre Position im Weltkoordinatensystem zu berechnen. Mobilfunknetze sind eine weitere Möglichkeit zur Positionierung von mobilen Geräten, unabhängig vom GPS.

Während das GPS eine zuverlässige Methode bietet seine Position in Außenbereichen mit minimalen Fehlern zu bestimmen, existieren für Innenbereiche keine solchen Standards. GPS kann für solche Zwecke nicht verwendet werden, da GPS-Signale durch die massiven Strukturen eines Gebäudes wie Dächer oder Wände stark beeinflusst oder gar komplett blockiert werden. Da es gerade in Innenbereichen auf eine höhere Genauigkeit ankommt, bietet GPS keinen akzeptablen Ansatz.

Bei der Implementierung eines Systems zur Positionierung mobiler Endgeräte in Innenräumen muss bisher zwischen hoher Genauigkeit und kostengünstigen Lösungen abgewägt werden. Während Infrarot oder *Radio Frequency Identification* präzise Positionen versprechen, erfordern sie gleichzeitig den Aufbau einer teuren Infrastruktur. Daher greifen die meisten Lösungen auf bereits bestehende Infrastrukturen zurück, wie etwa die Funkinfrastruktur *Wireless Access Network* (WLAN) für Netzwerkkommunikation. WLAN ist in

den meisten öffentlichen Gebäuden, in denen eine Positionierungslösung wertvoll ist, bereits für mobilen Zugriff auf Datennetzwerke wie Intranet oder Internet installiert. Ferner kommen bei der Positionierung in Innenbereichen andere Funktechnologien wie Bluetooth, *Near-Field-Communication* oder die Ultrabreitband-Technik zum Einsatz, die sich in den letzten Jahren ebenfalls für verschiedene Anwendungszwecke verbreitet haben.

Neben der breiten Verfügbarkeit ist ein weiterer Vorteil für die Positionierung anhand von Funkverbindungen wie dem WLAN oder Bluetooth, dass die meisten heute auf dem Markt verfügbaren mobilen Endgeräte wie Smartphones eine Vielzahl unterschiedlicher Sensoren besitzen. Darunter sind zum einen die verschiedenen Funkadapter wie WLAN und Bluetooth zu verstehen, die auch als Sensor der Signalstärke eingesetzt werden können, andererseits aber auch Beschleunigungssensoren und Kompass, die ebenfalls zur Positionierung genutzt werden können. Ein relativ neuer Standard, der in die neue Generation von Smartphones integriert ist, wird als *Wi-Fi Direct* bezeichnet. *Wi-Fi Direct* ist ähnlich wie Bluetooth ein Standard für Ad-hoc-Netzwerk zur direkten Datenübertragung zwischen verbundenen Endgeräten. Im Gegensatz zu WLAN sind für die Kommunikation mittels *Wi-Fi Direct* keine Basisstation oder *Access Points* notwendig.

1.2 Motivation

In großen öffentlichen Gebäude wie beispielsweise Flughäfen, Krankenhäusern oder Museen sind Positionierungssysteme für die Orientierung sehr hilfreich. Dabei ist nicht nur das Navigieren selbst von Bedeutung, sondern auch Informationen, die durch eine Positionierung gewonnen werden. Diese Informationen können beispielsweise für gezielte Werbung oder zur ortsbezogenen Anzeige von Informationen von Bedeutung sein.

Mobile Endgeräte wie Smartphones oder Tablet-Computer, bieten durch ihre vielen integrierten Sensoren eine gute Grundlage zur Positionsbestimmung. Durch die Möglichkeit über Ad-hoc-Netzwerke mit nahegelegenen Geräten zu kommunizieren und Daten auszutauschen bildet sich ein ganzes Sensornetz, in dem Daten über größere Bereiche verbreitet werden können.

Positionierungssysteme für Innenbereiche sind schon seit einigen Jahren ein relevantes Forschungsthema. Da das GPS keine akzeptablen Genauigkeiten für Innenbereiche bietet, wurden dafür schon unterschiedliche Methoden sowie Technologien untersucht und eingesetzt. Bis heute haben sich jedoch für die Innenraumpositionierung keine Standards etabliert. Wegen ihrer breiten Verfügbarkeit in Innenbereichen, der Verfügbarkeit entsprechender Sensoren in mobilen Endgeräten sowie niedriger Kosten nutzen die meisten heute verfügbaren Systeme Funkverbindungen wie das WLAN.

Die Nutzung des 802.11x Standards ermöglicht eine Positionierung mobiler Endgeräte, sowohl in Innen- als auch in Außenbereichen. Die verschiedenen kostengünstigen Positionierungsmethoden nutzen dabei die Eigenschaften von Signalen wie beispielsweise die Signalstärke der Funkverbindung. Eine Methode, die auf Signalstärken basiert, ist die Fingerprinting-Methode. Sie besteht aus einer Offline-Phase, in der möglichst viele Stellen im Gebäude mit einem „Fingerabdruck“ versehen werden und einer Online-Phase, in der mit Hilfe des WLAN-Sensors die aktuellen Sensorwerte mit den hinterlegten Daten abgeglichen wird. Über eine Ähnlichkeitsmetrik wird der passende Fingerabdruck ermittelt und die zugehörige Position an die Anwendung zurückgegeben. Fingerprinting erreicht Genauigkeiten von wenigen Metern, hat jedoch den Nachteil, dass die Generierung einer Referenzdatenbank in der Offline-Phase sehr zeitaufwändig ist. Ferner muss bei jeglichen Veränderungen in der Infrastruktur auch die Referenzdatenbank aktualisiert werden. Für Positionierungen in Innenbereichen kommen WLAN-Signalstärken neben Fingerprinting auch in Signalausbreitungsmodellen zur Anwendung. Mit diesen Modellen kann anhand der Signalstärke die Distanz zu Stationen berechnet werden, die das jeweilige Signal ausstrahlen. Die Ausbreitung von Signalen ist allerdings ein komplexes Problem, da diese durch vielerlei Effekte wie Dämpfung, Beugung, Streuung oder Reflexion und anderen Geräten, die den gleichen Frequenzbereich benutzen, beeinflusst werden können. Der Vorteil von solchen Positionierungsverfahren gegenüber Fingerprinting ist aber, dass die zeitaufwendige Sammlung von Daten aus der ganzen Umgebung entfällt.

Kooperative Positionierung mobiler Endgeräte ist ein neuer Zweig im Bereich funkbasierter Positionierungsmethoden. Kooperative Verfahren sind eine Kombination aus Navigationssystemen, Ad-hoc-Netzwerken und der Informationsverarbeitung. Dabei nutzen mobile Endgeräte zur Positionierung die Positionsangaben ihrer über das Ad-hoc-Netzwerk verfügbaren Kommunikationspartner. Die Kooperation zwischen mobilen Endgeräten kann sowohl für die Eigenlokalisierung als auch zur Verbesserung der Genauigkeiten bestehender Positionierungsverfahren genutzt werden. Kooperative Verfahren sind beispielsweise in der Automobilindustrie ein aktuelles Forschungsthema. Gerade wenn der Sichtkontakt zu GPS-Satelliten in urbanen Gebieten oder in einem Tunnel gehindert und damit die Genauigkeit der Positionierung beeinflusst wird, kann die Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern eine bessere Genauigkeit bei der Positionierung ermöglichen. Höhere Genauigkeiten der Verkehrsteilnehmer sind Grundlage für Weiterentwicklungen wie beispielsweise Systeme, die für die Sicherheit im Verkehr zur Vorbeugung von Unfällen zuständig sind.

In Innenbereichen kann die Anwendung kooperativer Positionierungsverfahren ebenfalls von Bedeutung sein. Wie bereits erwähnt, können die in Innenbereichen zur Positionierung eingesetzten Methoden relativ fehleranfällig sein. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Positionierung ist sicherlich die Kombination verschiedener Sensoren und der Fusion aller extrahierten Informationen zu einer am besten passendsten Position. Der Betrieb von

unterschiedlichen Sensoren eines mobilen Geräts erfordert allerdings immer auch einen höheren Energieverbrauch, weshalb man sich bei einer kontinuierlichen Nutzung über diese Problematik Gedanken machen muss. Basiert ein System auf Sensoren, die überwiegend deaktiviert sind, ist die Erfolgchance des Systems sehr gering. Eine weitere Möglichkeit ist die Kooperation bzw. der Informationsaustausch mit anderen mobilen Geräten. Neben der Verbesserung von Genauigkeiten kann kooperativ auch eine Positionierung von mobilen Geräten an sich stattfinden. In so einem System gibt es Geräte, die ihre Position im Gebäude bereits kennen und den Geräten mit unbekanntem Positionen zur Positionierung verhelfen sollen. Dadurch erübrigt sich eventuell die Notwendigkeit einer flächendeckenden Installation von zusätzlicher Infrastruktur. Einzelne Referenzpunkte können die initialen Positionsgeber sein. Eine solche kooperative Positionierung kann beispielsweise dann nützlich sein, wenn ein mobiles Geräte kein Zugriff auf die Infrastruktur im Gebäude hat oder die Infrastruktur nicht das gesamte Gebäude abdeckt.

Kooperative Positionierungsverfahren können als sinnvolle Ergänzung zu jeder infrastrukturbasierten Methode eingeführt werden. In einem Fingerprinting-System kann beispielsweise die Kooperation über Ad-Hoc-Netzwerke dazu beitragen, Referenzdaten zu verteilen und neue Sensoren zu kalibrieren. Somit muss beispielsweise nicht die unterschiedliche Empfangscharakteristik verschiedener Wi-Fi Antennen berücksichtigt werden.

Der kooperative Ansatz zur Positionierung von Smartphones mit unbekanntem Positionen wird in dieser Diplomarbeit verfolgt. Das Ziel der Arbeit ist dabei die Implementierung eines kooperativen Innenraumpositionierungssystems, das die unbekanntem Position eines Smartphones mit Hilfe seiner Nachbargeräte bzw. über ein Ad-hoc-Netzwerk verbundenen Kommunikationspartner bestimmen kann.

1.3 Gliederung der Diplomarbeit

Der Rest dieser Diplomarbeit ist folgendermaßen gegliedert:

Kapitel 2 behandelt verschiedene Grundlagen, die in dieser Diplomarbeit von Bedeutung sind. Dabei geht es zunächst um Funktechnologien und Funksignale im Allgemeinen, anschließend werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Innenraumpositionierung thematisiert und verschiedene Propagierungsmodelle für Funksignale vorgestellt. Es folgen Mathematische Grundlagen, bisherige Arbeiten in Bereich der Innenraumpositionierung, der Ansatz dieser Diplomarbeit sowie die Abgrenzung dieser Arbeit zu anderen bereits bestehenden Arbeiten.

In Kapitel 3 wird der Systemaufbau, das Konzept sowie die Umsetzung des kooperativen Positionierungssystems dieser Diplomarbeit geschildert. Dazu wird auf die einzelnen Bestandteile der Systeminfrastruktur eingegangen, sowie das Konzept zur Umsetzung vor-

gestellt. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschreibt detailliert die Umsetzung des kooperativen Positionierungssystems.

In Kapitel 4 erfolgt die Evaluierung des vorgestellten kooperativen Positionierungssystems. Dabei wird zunächst auf das Evaluierungsverfahren eingegangen. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Evaluierung vorgestellt und erläutert.

Kapitel 5 gibt eine kurze Zusammenfassung der behandelten Themen und einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten in diesem Bereich.

Kapitel 2

Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt Themen, die Grundlage dieser Diplomarbeit sind. Dabei geht es zunächst um Funktechnologien und Funksignale im Allgemeinen. Danach folgt ein Überblick der Methoden zur Innenraumpositionierung und verschiedener Propagierungsmodelle zur Ausbreitung von Funksignalen. In den mathematischen Grundlagen geht es um Verfahren, die für Positionsberechnungen verwendet werden können. In den letzten drei Abschnitten dieses Kapitels wird auf bisherige Arbeiten, den Ansatz dieser Diplomarbeit und die Abgrenzung zu bestehenden Arbeiten eingegangen.

2.1 Funktechnologien und Funksignale

2.1.1 Funktechnologien

Vor dem Hintergrund der stetig zunehmenden Mobilitätsbedürfnisse und deren Gewährleistung, ist der Aufbau von nachhaltigen und zweckgebundenen Infrastrukturen eine unverzichtbare Voraussetzung.

Bei der Entwicklung von Positionierungssystemen für Innenbereiche besteht die Möglichkeit eine nur zu diesem Zwecke aufgebaute Infrastruktur zu nutzen oder auf bereits bestehende Infrastrukturen zurückzugreifen. Die Entscheidung über eine entsprechende Infrastruktur wird meistens durch entstehende Kosten und die geforderten Genauigkeiten des Systems beeinflusst. Infrarot beispielsweise ermöglicht durch seine kleinen Reichweiten zwar gute Genauigkeiten, erfordert aber auch einen teuren Aufbau der entsprechenden Infrastruktur.

Das *Wireless Access Network* (WLAN) hingegen ist eine Funktechnologie, die heutzutage in den meisten öffentlichen Gebäuden bereits für andere Zwecke installiert worden ist. In einem WLAN-Netzwerk senden stationäre Basisstationen oder *Access Points* in regelmä-

ßigen Intervallen Datenpakete an alle Geräte, die mit einem WLAN-Sensor ausgestattet sind und sich innerhalb der Reichweite befinden. Die Kommunikation aller Teilnehmer im Netzwerk geschieht über diese Basisstationen. Aus einer Reihe von IEEE 802.11 Spezifikationen mit der Reichweite von 50-100 Meter für die Kommunikation in WLAN-Funknetzen, etablierte sich die IEEE 802.11b Version als industrieller Standard. Diese Version ist auch als *Wi-Fi* bekannt [3] und arbeitet auf einer Frequenz von 2,4 GHz. Andere Standards wie das IEEE 802.11n können auch auf höheren Frequenzen, wie beispielsweise 5 GHz arbeiten.

Während beim WLAN Geräte nur über ein Netzwerk miteinander kommunizieren können, entstand in den letzten Jahren eine neue Technologie unter den Namen Wi-Fi Direct. Mit Wi-Fi Direct ist eine direkte Kommunikation ohne Basisstationen von WLAN-Endgeräten möglich [4]. Geräte wie beispielsweise Smartphones können somit eine *Peer-to-Peer* (P2P) Verbindung untereinander aufbauen. Über die aufgestellte Verbindung kann ein Datenaustausch zwischen den verbundenen Geräten stattfinden sowie auch die Signalstärke dieser Verbindung gemessen werden. Wi-Fi Direct ist Teil der IEEE 802.11 Norm und unterstützt die Standards a/g/n. Wi-Fi Direct arbeitet auf dem Frequenzbereich von 2,4 GHz, wobei einige mit Wi-Fi Direct ausgestatteten Geräte auch im 5 GHz Bereich arbeiten können. Die Reichweite von Wi-Fi direct beträgt bis zu 200 Meter.

Eine weitere Funktechnologie, welche öfters in Gebäuden vorhanden ist und zur Positionierung verwendet werden kann, ist Bluetooth. Bluetooth gehört der IEEE 802.15 Norm und arbeitet auf einer Frequenz von 2,4 GHz mit einer Reichweite von 10 bis 15 Metern [2]. Ähnlich wie das Wi-Fi Direct ermöglichen Bluetooth-Sensoren in Geräten den Aufbau einer Bluetooth Verbindung sowie einen Datenaustausch zwischen den verbundenen Geräten.

2.1.2 Funksignale

Die Kommunikation über Funk basiert auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, die von einer Senderantenne in den Raum ausgestrahlt werden und von einer Empfängerantenne wieder in die ursprüngliche Nachricht konvertiert werden. Die Stärke des elektrischen Feldes bzw. die gemessene Leistung in einem Punkte wird als Signalstärke des Funksignals bezeichnet.

In IEEE 802.11 Funknetzen kann die Signalstärke in Milliwatt (mW), Dezibel-Milliwatt (dBm), als *Received Signal Strength Indication* (RSSI) oder in Prozentangaben dargestellt werden [5]. Während Watt die Basiseinheit für die Leistung ist, stellt dBm eine logarithmische Größe dar, die relativ zu 1 mW ist. RSSI ist ein Indikator für die beim Empfänger gemessene Leistung und stellt ebenfalls eine relative Größe dar.

Die Ausbreitung von elektromagnetischen Funkwellen ist ein sehr komplexes Problem. Signale können auf ihrem Weg vom Sender zum Empfänger von unterschiedlichen Faktoren

beeinflusst werden. Als wichtigste können dabei Reflexion, Streuung und Beugung genannt werden [6].

Die Reflexion verursacht, dass bei der Ausbreitung ein Teil der elektromagnetischen Welle an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften zurück reflektiert wird ohne Absorption der Energie. Sind Hindernisse, auf die eine elektromagnetische Welle stößt, klein im Gegensatz zu der Wellenlänge, so wird die Welle in alle Richtungen gestreut. Der Beugungseffekt hat zur Folge, dass obwohl die Ausbreitung der Welle durch ein Hindernis gestört wird, diese sich auch in der abgeschirmten Umgebung weiter ausbreiten kann. Reflexion, Streuung und Beugung sind Ursachen für einen Mehrwegempfang, bei welchem Signale vom Sender aus auf unterschiedlichen Wegen zum Empfänger kommen.

Breitet sich eine elektromagnetische Welle von einer Sender- zu einer Empfängerantenne, so geschieht eine Abschwächung der Signalstärke dieser Welle. Diese Eigenschaft einer Welle wird auch als Pfadverlust bezeichnet [7]. Signalstärken der Funkwellen können zudem zeitliche Schwankung aufweisen, was auch als *Fading* bezeichnet wird. Die Ursachen eines solchen Verhaltens können sehr vielfältig sein, wie etwa die Bewegung von Menschen oder Objekten.

2.2 Positionierungsmethoden in Innenbereichen

Kontextbezogene Anwendungen gewinnen im alltäglichen Gebrauch immer mehr an Bedeutung. Dazu gehören auch standortbezogene Dienste oder *Location Based Services* (LBS). Das *Global Positioning System* (GPS) ist das bekannteste Positionierungssystem für Außenbereiche. Mit GPS ist jedes mit einem GPS-Sensor ausgestattete Gerät, in der Lage seine Position im Weltkoordinatensystem sowie seine Geschwindigkeit zu berechnen. Diese Technologie kommt insbesondere bei Navigationssystemen in Autos oder Flugzeugen zur Anwendung. Obwohl das GPS eine gute Positionierungsmethode für Außenbereiche darstellt, bietet es für Innenbereiche keine akzeptablen Genauigkeiten [2]. Dächer oder Wände eines Gebäudes können die Signale der Satelliten stark beeinflussen, sodass diese abgeschwächt oder gar ganz blockiert werden.

Mobilfunknetze sind Infrastrukturen, die eine Signalübertragung zwischen mobilen Telefonen ermöglichen. Mobilfunknetze können selbst im Außenbereich nur eine grobe Eingrenzung der Position bestimmen und sind daher kein valider Ansatz für eine Innenraumpositionierung.

Während für die Positionierung in Außenbereichen hauptsächlich das GPS verwendet wird, existieren in Innenbereichen dafür unterschiedliche Ansätze. Bisher haben sich zur Innen-

raumpositionierung keine einheitlichen Standards etabliert. Die meisten bisher entwickelten Positionierungssysteme basieren jedoch auf Funktechnologien.

Positionierungssysteme für Innenbereiche können generell in zwei Kategorien aufteilt werden, nämlich Systeme die spezifische Kenntnisse über die Umgebung bzw. die Infrastruktur in das System integrieren und solche die dies nicht machen [8], [9]. Kenntnisse aus der Umgebung können beispielsweise die Positionen der Basistationen eines Funknetzes sein. Anhand dieser Positionen können die Eigenschaften der Signale zwischen Sender und Empfänger untersucht und zur Positionierung genutzt werden [2], [8], [10]. Eigenschaften von Signalen können dabei die Signalstärke, *Time of Arrival* (TOA), *Time Difference of Arrival* (TDOA) oder auch *Angle of Arrival* (AOA) sein. Während Signalstärken, TOA und TDOA zu den Verfahren gehören, die den Abstand zu den Sendern dazu nutzen, um die Position des Empfängers anhand der Lateration zu bestimmen, nutzt AOA die winkelbasierte Angulation.

Die Signalstärke einer Funkverbindung ist im Idealfall ein Indikator für den Abstand zwischen Sender und Empfänger. Daher werden Signalstärken meist in Kombination mit Propagierungsmodellen der Funksignale genutzt, um diese Distanz berechnen zu können. Das Verhalten von Funksignalen stellt allerdings ein sehr komplexes Problem dar und ist auch stark von der betrachteten Umgebung abhängig. Deshalb erfordern Propagierungsmodelle zunächst eine Kalibrierung in der entsprechenden Umgebung.

Die TOA Methode berechnet zur Positionierung die Umlaufzeit von Signalen. Die Hälfte dieser Zeit entspricht der Distanz zwischen Sender und Empfänger, dessen Position noch zu bestimmen ist. TOA benötigt jedoch perfekt synchronisierte Uhren, da kleine Abweichungen große Distanzunterschiede zur Folge haben können.

TDOA ist ein ähnliches Verfahren wie das TOA. Hier wird allerdings der Unterschied in der Zeit beim Empfang eines Signals an unterschiedlichen Stellen betrachtet. TDOA erfordert ebenfalls exakt synchronisierte Uhren.

AOA bestimmt die Position anhand des Winkels von Sendern empfangener Signale. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Bestimmung des Winkels eine besondere Hardware erfordert.

Fingerprinting gehört zu den Verfahren, die keine spezifischen Kenntnisse über die Umgebung voraussetzen. Dieses Verfahren kommt aus dem Bereich der Szenenanalyse [2]. Die Fingerprinting-Methode besteht aus zwei verschiedenen Phasen, einer Offline-Phase und einer Online-Phase. In der Offline-Phase geht es darum Merkmale aus der Umgebung zu extrahieren und zu speichern. Die Online-Phase dient zur Positionierung. In dieser Phase findet ein Abgleich zwischen den gespeicherten Daten aus der Offline-Phase und aktuell beobachteten Merkmalen statt. Oftmals wird Fingerprinting zusammen mit einer Funktechnologie wie dem WLAN verwendet. In diesem Fall sind die Aufnahmeposition und

die Signalstärken der umliegenden Basisstationen Fingerprints, die in der Offline-Phase gespeichert werden. Der Abgleich dieser mit den aktuell gemessenen Signalstärken ermöglicht die Berechnung einer Position. Nachteilig ist bei Fingerprinting die zeitaufwendige Aufnahme und Speicherung der Referenzdaten in der Offline-Phase. Jegliche Änderungen der Umgebung oder der Infrastruktur erfordern auch die Aktualisierung der Referenzdaten.

Eine weitere Möglichkeit für die Positionierung in Innenbereichen stellen sogenannte Inertiale Navigationssysteme (INS) dar. Diese Systeme sind unabhängig von der Infrastruktur in einem Gebäude. Ein INS nutzt Bewegungssensoren und einen Gyroskop, um Schritte sowie die Richtung dieser Bewegung zu erkennen. INS benötigt immer die Angabe einer Startposition und nutzt die vorherige Position als Ausgangspunkt für die nachfolgende Berechnung. Damit summieren sich mögliche Fehler, sofern keine Synchronisierung der Position stattfindet, kontinuierlich auf.

2.3 Propagierungsmodelle der Funksignale

Die Ausbreitung von Funkwellen beschäftigt Wissenschaftler und Ingenieure schon seit einigen Jahrzehnten. Die Möglichkeit die Ausbreitung und Signalstärken elektromagnetischer Wellen vorherzusagen kann beispielsweise dazu verwendet werden, um eine gute Abdeckung der Umgebung durch ein Funknetz zu gewährleisten.

Propagierungsmodelle können in *large-scale* und *small-scale* Modelle unterteilt werden [6], [11]. *Large-scale* Propagierungsmodelle beschreiben den Verlust der Signalstärke mit der Distanz und geben die mittlere Signalstärke für diese Distanz an. *small-scale* Modelle dagegen versuchen schnelle Änderungen der Signalstärke über kleine Distanzen und kleine zeitliche Intervalle zu beschreiben. Da für Positionierungssysteme im Allgemeinen Signalwerte über größere Distanzen von Bedeutung sind, sind *small-scale* Propagierungsmodelle nicht Teil dieser Diplomarbeit.

Der Pfadverlust stellt eine positive Größe in Dezibel dar und ist die Differenz zwischen transmittierter und empfangener Leistung [6]. Das bedeutet der Pfadverlust PL in Abhängigkeit der Distanz d zwischen Sender und Empfänger ist im Allgemeinen definiert als

$$PL(d) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \quad [dB] \quad (2.1)$$

dabei sind P_t die transmittierte und P_r die empfangene Leistung. In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Pfadverlust im freien Raum bzw. Freiraumdämpfung vorgestellt und anschließend Pfadverluste, die in der Innenraumpositionierung Anwendung finden, erläutert.

2.3.1 Freiraumdämpfung

Friis [12] definiert die empfangene Leistung P_r im freien Raum, ohne Störeinflüsse, bei Distanz d zwischen einer Sender- und Empfängerantenne als

$$P_r = P_t * G_t * G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.2)$$

P_t ist die Leistung der Senderantenne, P_r die Leistung der Empfängerantenne, G_t ist der Antennengewinn des Senders, G_r der Antennengewinn des Empfängers und λ bezeichnet die Wellenlänge.

Der Antennengewinn lautet

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} * A_{eff} \quad (2.3)$$

wobei A_{eff} die Wirkfläche der Antenne ist. Für λ gilt

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

mit c als Lichtgeschwindigkeit und f als Übertragungsfrequenz. Formel 2.2 kann auch mit Hilfe der Wirkflächen von Sender- und Empfängerantenne A_t und A_r als

$$P_r = \frac{P_t A_r A_t}{(d\lambda)^2} \quad (2.5)$$

dargestellt werden.

Bei isotropischen Antennen - Antennen mit gleicher Strahlungsintensität in jede Richtung - gilt für die Wirkfläche

$$A_{isotr} = \frac{\lambda^2}{4\pi}. \quad (2.6)$$

Für isotropische Antennen ist die empfangene Leistung daher durch

$$P_r = P_t * \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.7)$$

gegeben.

Der Pfadverlust PL nach Friis mit Berücksichtigung der Antennengewinne ist

$$PL(d) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log_{10} \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right] \quad [dB] \quad (2.8)$$

bzw. ohne Berücksichtigung der Antennengewinne

$$PL(dB) = -10 \log_{10} \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \right] \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} &= -20 * \log_{10} c + 20 * \log_{10} f_{MHz} + 20 * \log_{10} 4\pi + 20 * \log_{10} d \\ &= -27,55 + 20 * \log_{10} f_{MHz} + 20 * \log_{10} d. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Der Verlust der Leistung eines Signals fällt nach nach der Freiraumdämpfung immer quadratisch mit dem Abstand ab.

2.3.2 Propagierungsmodelle in Innenbereichen

2.3.2.1 ITU Path Loss Model

Das ITU Modell [13] definiert den Pfadverlust PL als

$$PL(d) = 20 * \log_{10} f_{MHz} + n * \log_{10} d + Lf(b) - 28 \quad [dB] \quad (2.11)$$

dabei ist d die Distanz in Meter, f die Übertragungsfrequenz in MHz, n der Koeffizient des Pfadverlustes, b steht für die Anzahl der Stockwerke zwischen Sender und Empfänger und $Lf(b)$ ist der Faktor der Verlustleistung des Bodens eines Stockwerks in Dezibel. Wird lediglich ein Stockwerk betrachtet, so gilt $Lf(b) = 0$.

2.3.2.2 Log-Distance Path Loss Model

Ein sehr einfaches Modell für den Pfadverlust in Innenbereichen ist das *Log-Distance Path Loss Model* [6]. Der Pfadverlust PL ist dabei definiert als

$$PL(d) = PL(d_0) + n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad [dB] \quad (2.12)$$

d ist die Distanz zwischen Sender und Empfänger in Meter, d_0 ist eine Referenzposition. Meistens wird als Referenzposition 1 Meter genommen. $PL(d_0)$ ist der Pfadverlust an der Referenzposition. Dieser kann beispielsweise mit Hilfe der Freiraumdämpfung berechnet oder durch Messungen bestimmt werden. n steht für den Koeffizienten des Pfadverlustes und X_σ für eine Zufallsvariable mit der Standardabweichung σ .

2.3.2.3 Attenuation Factor Model

Für NLOS Szenarien kann die Formel für das *Log-Distance Path Loss Model* erweitert werden [6], sodass der Verlust der Leistung durch ein Stockwerk in Betracht gezogen wird

$$PL(d) = PL(d_0) + n_{sf} \log_{10} \frac{d}{d_0} + FAF \quad [dB]. \quad (2.13)$$

Der Koeffizient n_{sf} wird für ein Stockwerk möglichst gut bestimmt und kann anschließend mit Hilfe der Annäherung des *Floor Attenuation Factor* (FAF) in dB bzw. des Dämpfungsfaktors für mehrere Stockwerke erweitert werden. Alternativ kann auch $FAF = 0$ gelten und ein entsprechender Koeffizient n_{mf} für mehrere Stockwerke bestimmt werden.

Eine weitere Erweiterung der Formel 2.13 betrachtet auch Wände und ihre physikalischen Eigenschaften bei der Berechnung des Pfadverlustes [8]. Es gilt

$$PL(d) = PL(d_0) + n_{sf} \log_{10} \frac{d}{d_0} + FAF + WAF \quad [dB]. \quad (2.14)$$

WAF definiert ist als

$$WAF = \sum_{i=1}^n k_i * l_i \quad [dB] \quad (2.15)$$

k_i bezeichnet die Anzahl der für ein Funksignal zu durchdringenden Wände vom Typ i und l_i ist die Dämpfung die ein Signal durch diese Wand erfährt.

2.4 Mathematische Grundlagen

2.4.1 Lateration

Die Lateration beschäftigt sich mit der Bestimmung der Position eines Punktes, wobei diese auf Abstandsmessungen zu einer gewissen Anzahl von Referenzpunkten basiert [2]. Das Ziel der Lateration ist daher zuerst den Abstand des zu positionierenden Punktes zu seinen Referenzpunkten zu berechnen. Jeder der berechneten Abstände dient als Radius eines mit dem jeweiligen Referenzpunkt als Mittelpunkt aufgestellten Kreises. Bei der Positionierung eines Punktes mittels Lateration ist die Anzahl der Referenzpunkte bzw. die Anzahl der aufgestellten Kreise von Bedeutung.

Gibt es lediglich einen Referenzpunkt und somit auch nur einen aufgestellten Kreis, kann eine eindeutige Positionierung nicht stattfinden, da die Richtung unbekannt bleibt. Es ist lediglich bekannt, dass sich die gesuchte Position irgendwo auf der Kreislinie befindet. Dieser Fall ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

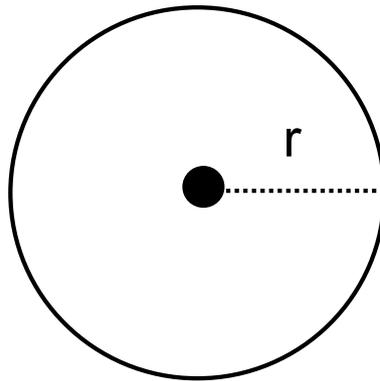


Abbildung 2.1: Lateration mit einem Referenzpunkt. Die gesuchte Position ist auf der Kreislinie, es aber ist keine eindeutigere Aussage möglich, da die Richtung unbekannt bleibt.

Bei mehreren Referenzpunkten werden zur Positionierung die Schnittpunkte der aufgestellten Kreise gesucht. Sind also zwei Referenzpunkte bekannt, so schneiden sich ihre Kreise in zwei Punkten. Daher ist auch hier keine eindeutige Aussage über die Position möglich. Abbildung 2.2 zeigt den Fall mit zwei aufgestellten Kreisen.

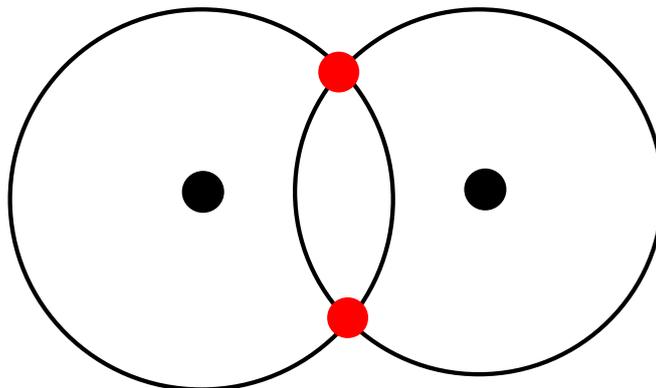


Abbildung 2.2: Lateration mit zwei Referenzpunkten. Kreise schneiden sich in zwei Punkten, daher kann nicht gesagt werden, welcher der Schnittpunkte die gesuchte Position darstellt.

Erst bei drei Referenzpunkten bzw. drei aufgestellten Kreisen ist eine eindeutige Positionierung möglich. Drei Kreise haben einen eindeutigen Schnittpunkt, welche die gesuchte Position darstellen. Abbildung 2.3 stellt diesen Fall grafisch dar.

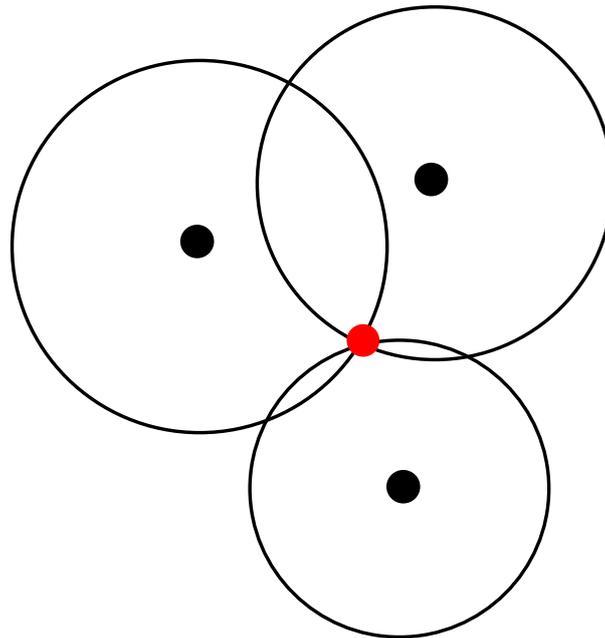


Abbildung 2.3: Lateration mit drei Referenzpunkten. Drei Kreise schneiden sich in einem Punkt und dieser Schnittpunkt ist die gesuchte Position.

Die Lateration mit drei Referenzpunkten wird auch als Trilateration bezeichnet. Sind noch mehr Referenzpunkte und die entsprechenden Abstände bekannt, so spricht man von einer Multilateration.

Eine zu der Lateration verwandte Technik ist die Angulation. Angulation betrachtet keine Abstände, sondern Winkelmessungen innerhalb von Dreiecken die weiter zur Positionsbestimmung verwendet werden.

Ein möglicher Lösungsansatz der Lateration ist die Methode der kleinsten Quadrate, welche Teil der nächsten Abschnitte ist.

2.4.2 Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate nach Gauß [14] dient zur Anpassung einer Modellfunktion an empirisch erhobene Daten bzw. Messwerte. Die Modellfunktion besitzt Parameter die zur Anpassung der Funktion an die Messwerte dienen.

Um eine gute Angleichung der Modellfunktion an die empirisch erhobenen Daten zu erreichen, ist es notwendig möglichst viele Messungen zu unternehmen. Die Anzahl der Messungen ist in der Regel erheblich größer als die Anzahl der unbekannt Parameter. Die Bestimmung der unbekannt Parameter der Modellfunktion mit Hilfe der Messungen ergibt damit ein überbestimmtes Gleichungssystem.

Messungen sind üblicherweise fehleranfällig, daher besitzt das überbestimmte Gleichungssystem mit linearen oder nichtlinearen Gleichungen keine exakte Lösung. Aus diesem Grund werden sogenannte Fehlergleichungen oder Residuen eingeführt. Die Methode der kleinsten Quadrate nach Gauß berechnet die Lösung der unbekannt Parameter einer Modellfunktion mit der Eigenschaft, dass die Summe der quadratischen Residuen bzw. Fehlerquadrate minimal ist.

Angenommen es existiert eine Menge von empirisch erhobenen Daten mit den Wertepaaren $(a_1, b_1) \dots (a_m, b_m)$, die durch einen entsprechenden Funktionstyp beschrieben werden müssen. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um eine durch den Ursprung verlaufenden Gerade der Form

$$\tilde{b} = a * x. \quad (2.16)$$

Gesucht ist nun der Wert des unbekannt Parameters x mit den Modellfunktionen

$$\tilde{b}_1 = a_1 * x, \dots, \tilde{b}_m = a_m * x,$$

sodass die Summe der Fehlerquadrate r^2 minimal ist. Damit ergibt sich eine Fehlerfunktion $F(x)$ mit

$$F(x) = \sum_{i=1}^m r_i^2 = \sum_{i=1}^m (\tilde{b}_i - b_i)^2. \quad (2.17)$$

In der Matrixschreibweise sind die Fehlergleichungen gegeben als

$$Ax - b = r \quad \text{mit} \quad A \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad b \in \mathbb{R}^m, \quad r \in \mathbb{R}^m \quad (2.18)$$

mit

$$\sum_{k=1}^n a_{ik} x_k - b_i = r_i, \quad \text{für } i = 1, \dots, m. \quad (2.19)$$

Die notwendige Bedingung dafür, dass $F(x)$ ein Minimum annimmt ist

$$\frac{dF(x)}{dx_j} \stackrel{!}{=} 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.20)$$

und liefert ein lineares Gleichungssystem bzw. die Normalgleichung

$$A^T Ax = A^T b \quad (2.21)$$

die mit der Cholesky- oder QR-Zerlegung gelöst werden kann.

2.4.3 Gauß-Newton-Verfahren

Lineare Ausgleichsproblemen der Form

$$Ax = b \quad \text{mit} \quad A \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad b \in \mathbb{R}^m, \quad n \leq m$$

und die Einführung von Fehlergleichungen r mit

$$Ax - b = r \quad \text{mit} \quad A \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad b \in \mathbb{R}^m, \quad r \in \mathbb{R}^m$$

führen nach der Methode der kleinsten Quadrate zum Minimierungsproblem

$$\|Ax - b\|_2^2. \tag{2.22}$$

Bei nichtlinearen Ausgleichsproblemen besteht zwischen den Beobachtungswerten und der Modellfunktion kein linearer Zusammenhang. Die empirisch erhobenen Daten müssen damit durch einen nichtlinearen Funktionstyp approximiert werden. Das Ziel ist auch hier die unbekannt Parameter der Modellfunktion so zu bestimmen, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal ist. Die Residuen ergeben sich wieder mit

$$r_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - b_i, \quad i = 1, \dots, m \tag{2.23}$$

wobei f_i die nichtlineare Modellfunktion mit ihren Unbekannten Parametern x_1, \dots, x_n ist und b_i die Beobachtungswerte oder Messungen sind. Mit der notwendigen Bedingung $\frac{dF(x)}{dx_j} \stackrel{!}{=} 0$ zur Minimierung der Fehlerfunktion $F(x)$

$$F(x) = \sum_{i=1}^m [f_i(x_1, \dots, x_n) - b_i]^2 \tag{2.24}$$

ergibt sich durch

$$\frac{dF(x)}{dx_j} = \sum_{i=1}^m [f_i(x_1, \dots, x_n) - b_i] \frac{df_i(x_1, \dots, x_n) - b_i}{dx_j} = 0, \quad j = 1, \dots, n \tag{2.25}$$

ein System von n nichtlinearen Gleichungen, dessen Lösung nur iterativ bestimmbar ist [14]. Iterative Verfahren, nähern sich schrittweise der gesuchten Lösung an, indem sie als Ausgangspunkt immer die letzte Berechnung nutzen.

Das Gauß-Newton-Verfahren approximiert bzw. linearisiert die Residuen r_i und führt das nichtlineare auf ein lineares Ausgleichsproblem zurück. Für eine Ausgangsposition $x^{(c)}$ er-

gibt sich mit der Approximation ein neues Residuum $\tilde{r}_i^{(c)}$

$$\tilde{r}_i^{(c)} = r_i(x^{(c)}) + J(x^{(c)}) * s_j \quad (2.26)$$

dabei entspricht $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ der Jacobi Matrix und ist definiert als

$$J(x) = \begin{pmatrix} \frac{dr_1(x)}{dx_1} & \cdots & \frac{dr_1(x)}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dr_m(x)}{dx_1} & \cdots & \frac{dr_m(x)}{dx_n} \end{pmatrix}. \quad (2.27)$$

s_j ist ein Korrekturwert der zur Näherung an die gesuchte Lösung verwendet wird. Mit den neuen Fehlergleichungen ergibt sich ein lineares Ausgleichsproblem der Form

$$\|r(x^{(c)}) + J(x^{(c)}) * s\|_2^2 \quad (2.28)$$

mit dem Korrekturvektor $s \in \mathbb{R}^n$ als gesuchte Größe.

Die Lösung dieses linearen Ausgleichsproblems entspricht der Normalgleichung

$$(J(x^{(c)})^T J(x^{(c)})) s = J(x^{(c)}) r(x^{(c)}) \quad (2.29)$$

die wieder mit der Cholesky- oder QR-Zerlegung gelöst werden kann.

Die Iterationsvorschrift des Gauß-Newton-Verfahrens lautet

$$x_j^{(c+1)} = x_j^{(c)} - s_j^{(c+1)}. \quad (2.30)$$

Sobald für eine gegebene Fehlerschranke f die Bedingung $\|x^{(c+1)} - x^{(c)}\| < f$ erfüllt ist, bricht das Verfahren ab.

2.5 Verwandte Arbeiten

Einer der ersten Innenraumpositionierungssysteme ist RADAR von Bahl und Padmanabhan [15]. RADAR basiert einerseits auf der Fingerprinting-Methode mit dem k-Nächste-Nachbarn-Verfahren sowie auf der Propagierung von Signalen.

In der Arbeit von Dhonge et al.[16] wurde ECOPS - ein System zur kooperativen Positionierung zwischen mehreren mobilen Geräten in Außenbereichen - vorgestellt. Die Positionierung mit Hilfe eines GPS-Sensors erfordert in der Regel einen hohen Energieverbrauch. Deshalb war die Idee der Autoren, dass lediglich Geräte die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine lange Batterielebenszeit besitzen, die GPS-Positionierung übernehmen. Dieses

Gerät startet anschließend den *Wi-Fi Hotspot Mode* und wird als *Positioning Broadcaster* (PB) bezeichnet. Alle anderen mobilen Geräte die sich auch positionieren wollen, jedoch eine kürzere Batterielaufzeit haben, sind *Positioning Receivers* (PRs). Zur Positionierung nutzt ein PR die aktuellen Positionen der PBs sowie Informationen über die Signalstärke des *Wi-Fi Hotspots*. Die Signalstärke wird zur Berechnung eines Radius um den entsprechenden PB genutzt. Ist der PR in der Lage mindestens drei Umkreise zu bestimmen, so wird mittels Trilateration ein Schnittpunkt dieser Kreise berechnet der die Position des PR darstellt. Mit dieser Methode wird der hohe Energieverbrauch der GPS-Positionierung reduziert und akzeptable Genauigkeiten erreicht.

Ymaguchi et al. stellten in ihrer Arbeit [17] zwei verschiedene Verfahren zur kollaborativen Positionierung zwischen mobilen Geräten in Innenbereichen vor. Der erste Ansatz basiert auf der TDoA Information von Funksignalen. Zu positionierende Geräte nutzen die TDoA Informationen sowie die bekannten Positionen von mindestens drei anderen Kommunikationspartnern, um ihre Position zu berechnen. Im zweiten Ansatz werden der Beschleunigungssensor und Kompass der mobilen Geräte sowie die Bluetooth-Signalstärke der Nachbarn zur Positionierung genutzt.

Chan et al. [18] versuchten die Genauigkeiten eines kommerziellen Wi-Fi-basierten Positionierungssystems durch Kollaboration mobiler Geräte zu verbessern. Dazu werden Nachbarn innerhalb wenigen Metern identifiziert und die Positionen auf ihre Zuverlässigkeit geprüft. Anhand dieser Information kann in einem letzten Schritt die Position des mobilen Geräts korrigiert werden.

Ein weiteres Beispiel für kollaborative Positionierung mobiler Geräte ist das System von Kloch et al. [19]. Dieses Positionierungssystem nutzt den integrierten Beschleunigungssensor und Kompass der mobilen Geräte, um seine Position zu bestimmen. Mit Hilfe von GPS wurden Geräte innerhalb wenigen Metern identifiziert und eine neue Position berechnet.

Positionierungssysteme die auf Funksignalen arbeiten, nutzen manchmal Modelle die versuchen eine Ausbreitung der Funkwellen vorherzusagen. Ein Beispiel ist das Verfahren von Barasocchi et al. [8]. In diesem Beispiel wird die Propagierung von Signalstärken in *Wireless Personal Area Networks* (WPAN) untersucht. Das System besteht aus zwei unterschiedlichen Phasen: einer Trainings- und einer Lokalisierungsphase. In der Trainingsphase tauschen alle Basisstationen Informationen untereinander aus. Basierend auf den gemessenen Signalstärken und dem bekannten Abstand zwischen den Stationen, bestimmt ein Lokalisierungsserver die Parameter der verschiedenen theoretischen Propagierungsmodelle. Die Modelle beachten dabei den Verlust bzw. die Dämpfung der Signalstärke, die durch Wände oder Stockwerke entsteht. In der Lokalisierungsphase werden aktuell gemessene Signalstärken der Basisstationen an den Server versendet, der für die Berechnung der Position des mobilen Gerätes mit Hilfe der Trilateration verantwortlich ist.

Auch Bose und Foh haben in ihrer Arbeit [10] für die Positionierung von mobilen Geräten in Innenbereichen basierend auf der Trilateration, den Zusammenhang zwischen gemessenen WLAN-Signalstärken des IEEE 802.11b Standards und des daraus ableitenden Radius untersucht. Die Bestimmung der Parameter des Propagierungsmodells erfolgte in einer LOS Umgebung. Unterschiedliche Parameterwerte kamen für kleine und große Distanzen zum Einsatz.

Ein weiteres Beispiel, das auf einem Propagierungsmodell von Funksignalen sowie der Trilateration Methode beruht, ist das Positionierungssystem von Mazuelas et al. [20]. In dieser Arbeit wird das beste Propagierungsmodell dynamisch bestimmt.

2.6 Ansatz

In dieser Diplomarbeit wird ein kooperatives Innenraumpositionierungssystem mit mehreren Smartphones entwickelt. Die Idee dabei ist, mit Hilfe seiner Nachbargeräte die Positionierung eines Smartphones im Gebäude zu bestimmen.

Die Kommunikation zwischen den Smartphones findet mit Wi-Fi Direct statt. Dazu wird eine Verbindung des zu positionierenden Geräts zu seinen Wi-Fi Direct Kommunikationspartnern aufgebaut. Die bekannten Positionsangaben der Kommunikationspartner sowie die zu ihnen berechneten Distanzen, dienen zur Positionsbestimmung mittels der Lateration. Die Suche nach der besten Lösung basiert dabei auf dem Gauß-Newton-Verfahren. Die Berechnung der Distanzen zu den Nachbargeräten erfolgt anhand eines Propagierungsmodells und der Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung. Kooperative Algorithmen verbessern die Genauigkeiten der Distanz- und Positionsbestimmung.

Das kooperative Positionierungssystem unterscheidet sich von bisherigen verwandten Arbeiten insofern, dass es nicht nur die Positionierung eines Smartphones anhand gegebener Aussagen ermöglicht, sondern diese Aussagen auf ihre Gültigkeit überprüft und korrigiert.

Kapitel 3

Kooperative Positionierung von Smartphones

In diesem Kapitel erfolgt die Realisierung des im Abschnitt 2.6 beschriebenen kooperativen Positionierungssystems. Dabei werden zunächst im Systemaufbau die einzelnen Bestandteile des Systems thematisiert. Anschließend folgt das Konzept und letztendlich die Umsetzung.

3.1 Systemaufbau

3.1.1 Gebäude

Die Testumgebung für das in dieser Diplomarbeit entwickelte kooperative Positionierungssystem befindet sich im zweiten Obergeschoss des Informatik Gebäudes an der Universität Stuttgart. Das Informatik Gebäude besitzt drei Stockwerke, welche durch lange Flure und Büros gekennzeichnet sind. Jedes Stockwerke kann in vier gleichmäßige Quadranten aufgeteilt werden. Abbildung 3.1 zeigt maßstabsgetreu das zweite Obergeschoss des Informatik Gebäudes. Die Gesamtbreite dieses Stockwerks beträgt 67,8 Meter und die Gesamtlänge 78,8 Meter. Die einzelnen Quadranten werden durch Korridore bzw. Flure getrennt. In der Abbildung 3.1 können drei vertikale sowie drei horizontale Flure identifiziert werden. Auf beiden Seiten eines jeden Flures - ausgenommen die vertikalen Flure am Rand - befinden sich Büros. Diese haben Breiten von ca. 2 bis 5 Meter und sind in der Abbildung durch eingerahmte Bereiche dargestellt. Die helleren Linien dieser Bereiche sind Türen.

Durch die Mitte des zweiten Stockwerks verläuft vertikal ein breiter Flur. Die zwei horizontalen Linien in der Mitte dieses Flures stellen zwei Glastüren dar, sodass dieser Flur

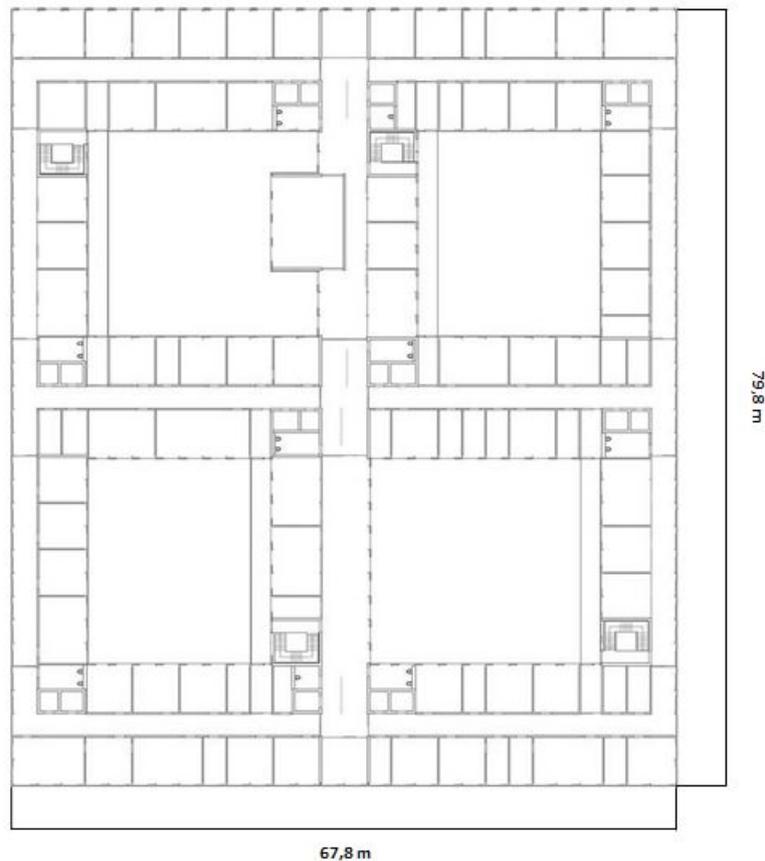


Abbildung 3.1: Informatik Gebäude - zweites Obergeschoss

in drei Teile aufgeteilt wird. Die vier hellen vertikalen Linien sind dagegen Trennwände innerhalb des Flures. Auch in den weiteren zwei äußeren vertikalen Fluren sind Glastüren vorhanden, die ebenfalls durch horizontale Linien dargestellt werden.

Die drei horizontalen Flure im zweiten Obergeschoss besitzen auch Glastüren, die durch vertikale Linien dargestellt sind. Die Glastüren grenzen die drei Flure vom breiten mittleren Flur ab.

3.1.2 Smartphones

Smartphones sind heutzutage aufgrund ihrer integrierten Sensoren in der Lage auf verschiedenen Wegen eine Verbindung miteinander aufzubauen und zu kommunizieren. Funkadapter beispielsweise ermöglichen den Austausch von Informationen zwischen den Geräten.

Der in den Smartphones integrierte WLAN-Adapter ermöglicht den Geräten, eine Kommunikation und Datenaustausch über zentrale Basisstationen. Wi-Fi Direct ist ein neuer

Standard der WLAN-Endgeräten die Datenübertragung ermöglicht ohne, dass dabei eine Basisstation notwendig ist. Eine weitere Möglichkeit der drahtlosen Datenübermittlung zwischen Smartphones ist der Bluetooth Standard.

Die kooperative Positionierung von Smartphones in dieser Diplomarbeit benötigt eine Möglichkeit der drahtlosen Datenübermittlung. Dazu wird das Wi-Fi Direct verwendet. Die Smartphones tauschen Informationen aus, die zur Positionierung verwendet werden. Die Informationen beinhalten Positionsangaben sowie die Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung.

Zur Realisierung des kooperativen Positionierungssystems standen vier verschiedene Smartphones zur Verfügung. Bei diesen Smartphones handelt es sich um Samsung Galaxy Nexus Geräte mit einem Android Betriebssystem in der Version 4.1.1. Die Signalstärke einer Wi-Fi Direct Verbindung kann in relativ kurzen Abständen gemessen werden, ca. jede Sekunde.

3.1.3 Datenbank

Das kooperative Positionierungssystem nutzt die Signalstärken der Wi-Fi Direct Verbindung zur Berechnung der Distanz zwischen zwei verbundenen Smartphones. Um diese Distanz berechnen zu können wird ein Propagierungsmodell benötigt, welches für die Testumgebung entsprechend kalibriert werden muss.

Die Datenbank, des in dieser Diplomarbeit entwickelten kooperativen Positionierungssystems, ist für die Speicherung der Kalibrierungsdaten zuständig. Sie ist nach einem Client/Server Modell aufgebaut und kann sowohl auf dem Smartphone als auch auf einen stationären Server abgelegt werden.

3.1.4 Systeminfrastruktur

Die Systeminfrastruktur besteht aus den im letzten Abschnitt beschriebenen vier Smartphones, einer Wi-Fi Direct Verbindung zwischen dem zu positionierenden Gerät und den anderen drei bereits positionierten Geräten sowie einer Datenbank.

Das mit den Informationen aus der Datenbank trainierte Propagierungsmodell, aktuell gemessene Signalstärken der Wi-Fi Direct Verbindung sowie Koordinaten der bereits positionierten Smartphones dienen zur Berechnung der noch unbekannt Position.

In der Abbildung 3.2 ist die Systeminfrastruktur des kooperativen Positionierungssystems dargestellt.

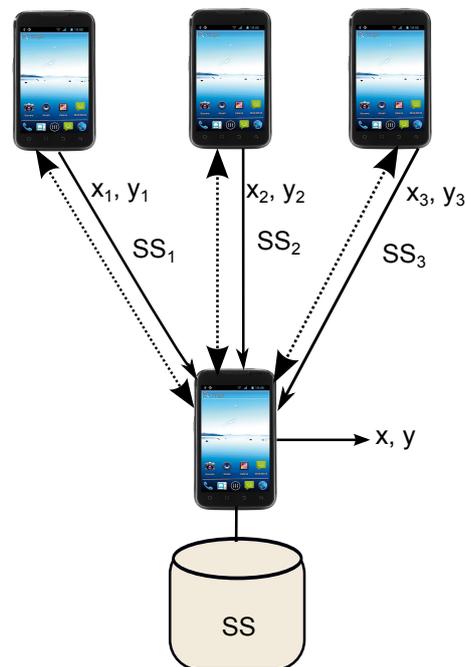


Abbildung 3.2: Systeminfrastruktur

Die gestrichelten Linien in der Abbildung 3.2 stehen für eine mögliche bidirektionale Verbindung zwischen dem zu positionierenden Gerät und seinen drei Nachbarn. Mit den vollen Linien ist die Kommunikation dargestellt. Bereits positionierte Smartphones versenden ihre x und y Koordinaten sowie die Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung an das noch zu positionierende Gerät.

3.2 Konzept

Das in dieser Diplomarbeit entwickelte Positionierungssystem basiert auf der Annahme, dass in einem Gebäude Smartphones vorhanden sind, die über eine Funkverbindung miteinander kommunizieren können. Dabei kennt ein dieser Smartphones seine Position in diesem Gebäude nicht. Die Idee ist nun auch dieses Smartphones mit Hilfe der anderen zu positionieren. Dabei sollen die Positionsangaben der anderen Smartphones sowie die Distanz zwischen dem zu positionierendem und den anderen mit ihm verbundenen Smartphones dazu verhelfen. Die Berechnung der Distanz basiert auf der Signalstärke der Funkverbindung sowie auf einem Propagierungsmodell.

Das kooperative Positionierungssystem besteht aus zwei verschiedenen Phasen. Die erste Phase beschäftigt sich zuerst mit der Auswahl eines Propagierungsmodells. Propagierungsmodelle besitzen unbekannte Parameter, damit sie auf die entsprechende Umgebung an-

gepasst werden können. In der zweiten, der Positionierungsphase, erfolgt die kooperative Positionierung.

In Abbildung 3.3 sind die einzelnen aufeinander aufbauenden Phasen des kooperativen Positionierungssystems grafisch dargestellt.

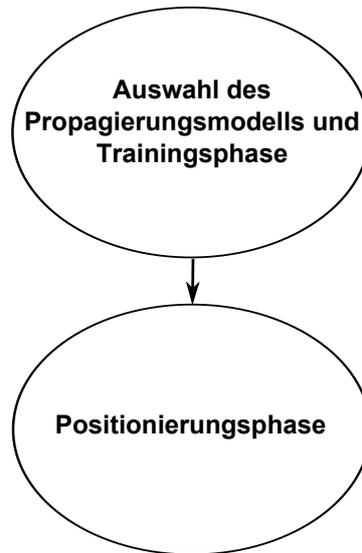


Abbildung 3.3: Phasen des kooperativen Positionierungssystems

Nachfolgend wird immer das zu positionierende Smartphone als Empfänger und die mit ihm über eine Funkverbindung verbundenen Smartphones mit bekannten Positionen als Sender bezeichnet.

3.2.1 Auswahl des Propagierungsmodells und Trainingsphase

Für die kooperative Positionierung ist zunächst die Berechnung der Distanz zwischen dem Empfänger und den Sendern notwendig. Eine wichtige Annahme für die Berechnung der Distanz anhand eines Propagierungsmodells und der Signalstärke ist, dass die Signalstärke der genutzten Funkverbindung auch ein Indikator für die Distanz zwischen den verbundenen Geräten ist. Für die Berechnung des Abstandes zwischen Empfänger und den Sendern anhand der Signalstärke, muss daher in einem ersten Schritt zunächst das entsprechende Propagierungsmodell ausgewählt werden.

Signalstärken von Funkverbindungen können in verschiedenen Umgebungen ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Propagierungsmodelle besitzen daher unbekannte Parameter um sie auf die Testumgebung optimieren zu können (vergleiche Abschnitt 2.3). Diese Optimierung findet anhand von Messdaten in der jeweiligen Testumgebung statt.

Abbildung 3.4 zeigt den Ablauf der Trainingsphase.

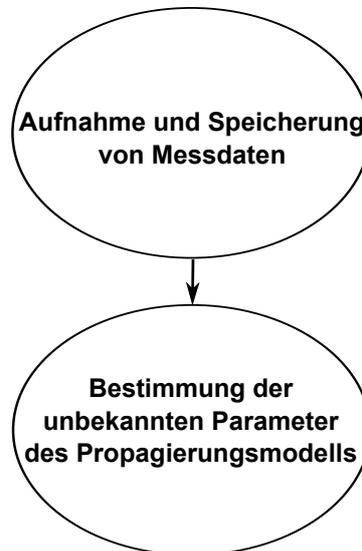


Abbildung 3.4: Ablauf der Trainingsphase des kooperativen Positionierungssystems

3.2.2 Positionierungsphase

Nachdem das entsprechende Propagierungsmodell ausgewählt und seine Parameter optimiert worden sind, kann die Positionierungsphase beginnen.

Der erste Schritt zur Positionierung des Empfängers ist, dass alle Sender über die Funkverbindung Nachrichten an den Empfänger verschicken. Diese Nachrichten enthalten die Position des jeweiligen Senders im Gebäude sowie die Signalstärke der Funkverbindung zwischen Empfänger und diesem Sender. Der Empfänger ist nun in der Lage zunächst die Distanz zwischen ihm und den einzelnen Sendern zu berechnen und anschließend mit einem Positionierungsalgorithmus auch seine eigene Position im Gebäude zu bestimmen.

In Abbildung 3.5 sind die einzelnen Schritte der Positionierungsphase aufgeführt.

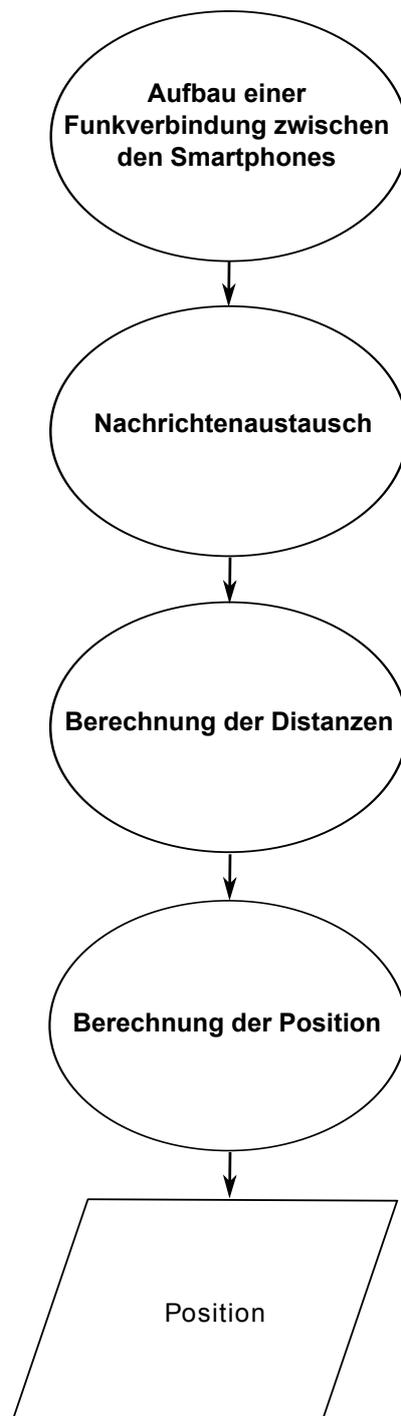


Abbildung 3.5: Ablauf der Positionierungsphase des kooperativen Positionierungssystems

Der in dieser Diplomarbeit verwendete Positionierungsalgorithmus basiert auf der Lateration (vergleiche Abschnitt 2.4.1). Für die Positionierung des Empfängers mit der Lateration,

ist entscheidend wie viele Sender an der kooperativen Positionierung teilnehmen. Angenommen es gibt immer ein Smartphone, den Empfänger, dessen Positionierung noch aussteht, so sind was die Anzahl der Sender angeht drei Fälle von Bedeutung: Es gibt entweder

- ein
- zwei
- drei oder mehr

Sender die an der Positionierung teilnehmen.

Im ersten Fall in welchem lediglich ein Sender vorhanden ist, muss der Empfänger zur Positionierung wie üblich die Position des Senders im Gebäude sowie die Signalstärke der Funkverbindung nutzen. Für jeden der Sender kann grafisch ein Kreis aufgestellt werden, mit seinen Positionsangaben bzw. Koordinaten als Mittelpunkt und der berechneten Distanz als Radius r . Dies ist in der Abbildung 3.6 dargestellt.

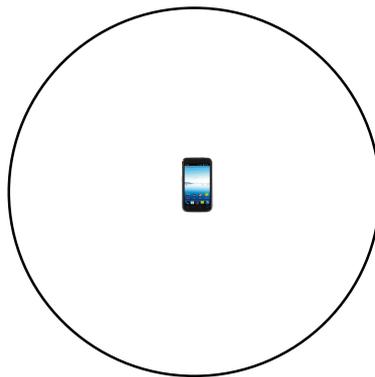


Abbildung 3.6: Lateration mit mit einem Sender und einem Empfänger

Das Smartphone in der Mitte des Kreises stellt die Position des Senders dar. Mit den über den Sender verfügbaren Informationen kann jedoch keine Eingrenzung der Position des Empfängers stattfinden. Jeder Punkt auf der Kreislinie ist eine mögliche Lösung. Bezüglich des maximalen Fehlers können in diesem Fall folgende Überlegungen gemacht werden: Positionierung des Empfängers

- a) an einem beliebigen Punkt auf der Kreislinie oder
- b) im Kreismittelpunkt.

Wird der Empfänger an einem beliebigen Punkt auf der Kreislinie positioniert, so kann im schlechtesten Fall die tatsächliche Position genau gegenüber liegen. Es ergibt sich ein

maximaler Fehler von $2r$. Die Positionierung des Empfängers in den Kreismittelpunkt ergibt dagegen einen maximalen Fehler von r .

Im zweiten Fall mit zwei verschiedenen Sendern ist zur Positionierung des Empfängers ebenfalls eine Aufstellung von Kreisen für jeden der Sender möglich. Wieder sind die Positionsangaben die Mittelpunkte und die für diesen Sender berechneten Distanzen der Radius des jeweiligen Kreises. Bei mehreren aufgestellten Kreisen gibt es immer die Möglichkeit, dass diese ein gemeinsames Zentrum haben bzw. sich alle Sender an der gleichen Position befinden. In dieser Situation sind alle Kreise gleich und bezüglich des maximalen Fehlers gilt die Argumentation wie im ersten Fall. Interessanter ist jedoch wie die Positionierung erfolgt wenn sich die aufgestellten Kreise schneiden. Schneiden sich zwei Kreise so gibt es genau zwei Schnittpunkte. Bezüglich des maximalen Fehlers bei der Positionierung können hier wieder folgende Überlegungen getroffen werden: Der Empfänger wird

- a) auf einen der beiden Schnittpunkte oder
- b) im Mittelpunkt der Schnittfläche

positioniert. Die erste Möglichkeit ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

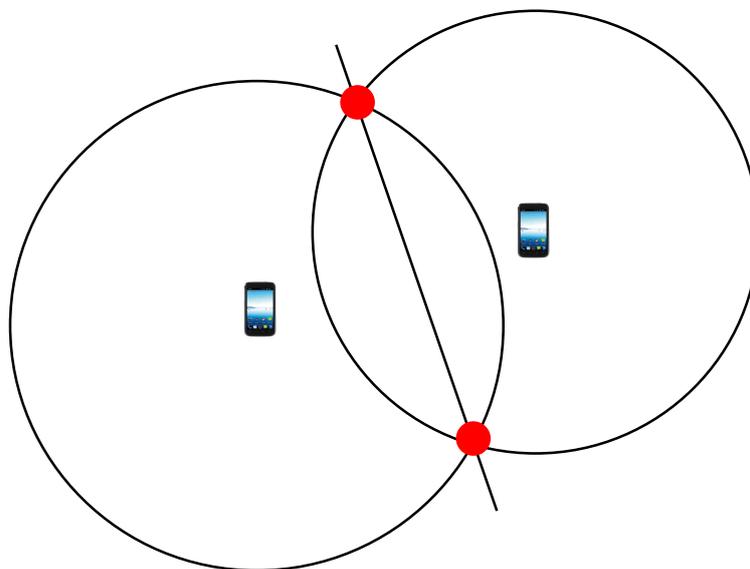


Abbildung 3.7: Lateration mit zwei Sendern und einem Empfänger - Positionierung auf den Schnittpunkten

Sei die Länge der Verbindungsstrecke zwischen den beiden Schnittpunkten h . Erfolgt die Positionierung des Empfängers auf einem der beiden Schnittpunkte, so ist der maximal mögliche Fehler h und zwar genau dann, wenn sich die tatsächliche Position genau im

anderen Schnittpunkt befindet. Die Positionierung im Mittelpunkt der Schnittfläche liefert dagegen einen maximalen Fehler von $\frac{h}{2}$. Dies ist in der Abbildung 3.8 dargestellt.

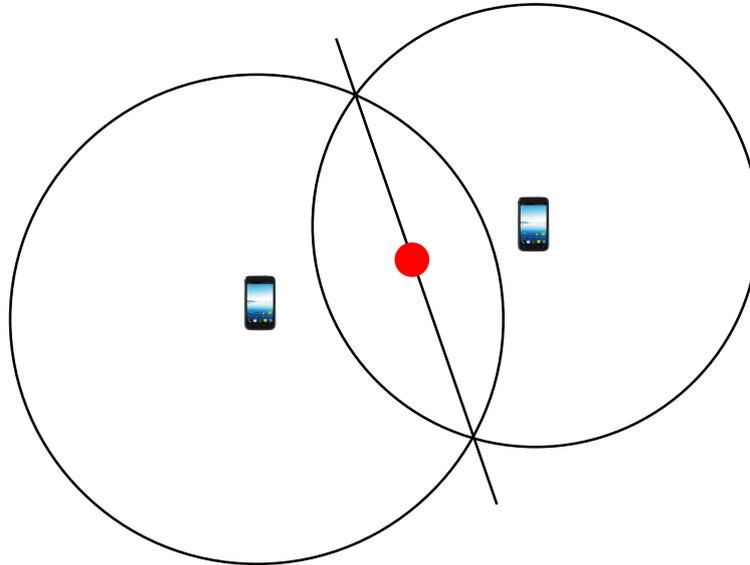


Abbildung 3.8: Lateration mit zwei Sendern und einem Empfänger - Positionierung im Mittelpunkt der Schnittfläche

Im letzten Fall sind an der Positionierung mindestens vier Smartphones beteiligt, d.h. es existieren mindestens drei Sender und ein Empfänger. Hier wird lediglich auf den Fall mit drei Sendern und einem Empfänger eingegangen, da sich die anderen Fälle analog ableiten lassen. Zur Positionierung kann wieder für jeden Sender ein Kreis aufgestellt werden mit seinen Positionsangaben als Zentrum und der zu ihm berechneten Distanz als Radius. Neben der Möglichkeit, dass alle Sender die gleiche Position haben, kann es hier vorkommen, dass sich die drei aufgestellten Kreise entweder in einem Punkt schneiden oder sie schneiden sich in zwei Punkten. Gibt es einen eindeutigen Schnittpunkt der drei aufgestellten Kreise, so ist die Position des Empfängers auch in diesem Punkt. Abbildung 3.9 zeigt dies grafisch.

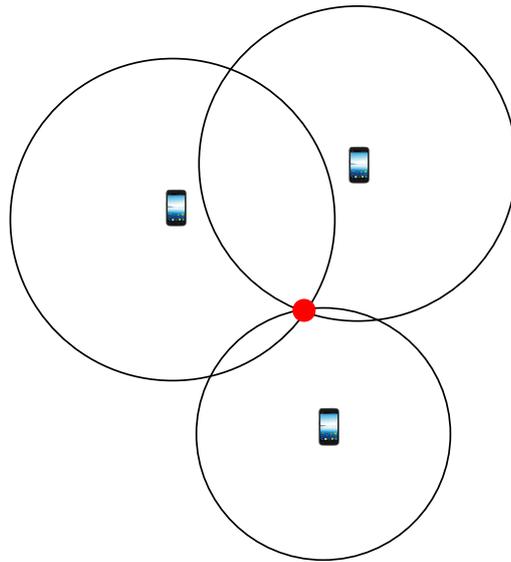


Abbildung 3.9: Trilateration - Positionierung im Schnittpunkt

Haben drei Kreise zwei Schnittpunkte, dann kann sich die Position des Empfängers auch nur in diesen zwei Schnittpunkten befinden. Dies ist in der Abbildung 3.10 dargestellt.

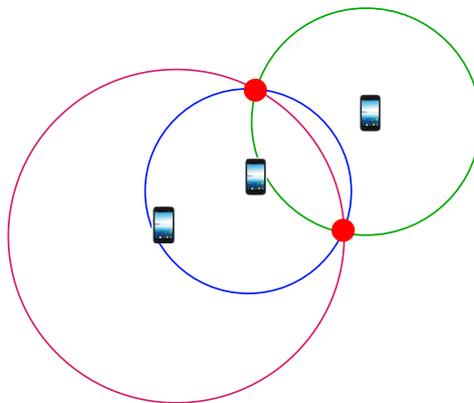


Abbildung 3.10: Trilateration - Positionierung auf den Schnittpunkten

Bezüglich des maximalen Fehlers gilt ähnlich wie im zweiten Fall, dass wenn die Verbindungsstrecke eine Länge von h hat, so ist auch der maximale Fehler h und zwar genau dann, wenn sich die reale Position im anderen Schnittpunkt befindet.

Alle in diesem Abschnitt behandelten Fälle gehen von einer fehlerfreien Berechnung der Distanzen zwischen Empfänger und Sender aus. Das kooperative Positionierungssystem in dieser Diplomarbeit berücksichtigt keine möglichen Abbrüche der Wi-Fi Direct Verbindung zwischen den Smartphones in der Positionierungsphase. Ferner wird angenommen, dass alle

Geräte gleichartig sind, d.h. es gibt keine Unterschiede zwischen den Geräten bezüglich des Verhaltens bei der Messung einer Signalstärke. Zusätzlich gilt, dass die Positionsangaben der Sender immer korrekt sind und sich die Sender zum Zeitpunkt der Berechnung der Distanzen nicht bewegen.

3.2.3 Visualisierung

Sowohl die Trainingsphase als auch die Positionierungsphase sollen auf den Smartphones visualisiert werden. In beiden Phasen gibt es eine Benutzeroberfläche, die das Bild der Testumgebung aus Abbildung 3.1 auf den Bildschirmen der Smartphones rendert. Das Bild ist verschiebbar und in unterschiedlichen Zoomstufen darstellbar.

In der Trainingsphase gibt es die Möglichkeit die Aufnahmepositionen manuell zu bestimmen oder eine automatische Aufnahme der Messwerte zu starten. In der Positionierungsphase ist für den Empfänger neben der Anzeige seiner berechneten Position auch die Anzeige der Positionen aller Sender verfügbar. Bei den Sendern wird lediglich die eigene Position angezeigt.

3.3 Umsetzung

Nachdem im vorigen Kapitel das Gesamtverfahren vorgestellt wurde, soll in diesem Kapitel nun die Umsetzung der Verfahrensschritte vorgestellt werden. Die folgenden Kapitel untergliedern sich dabei in die zwei Phasen aus Abbildung 3.3 und ihren Teilschritten wie aus Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 in Abschnitt 3.2 zu sehen.

3.3.1 Auswahl des Propagierungsmodells und Trainingsphase

In der ersten Phase des Verfahrens erfolgt zunächst die Auswahl eines Propagierungsmodells, das zur Bestimmung der Distanzen aus den Signalstärken der Wi-Fi Direct Verbindungen herangezogen wird. Anschließend werden die Parameter der Modellfunktion an die Gegebenheiten der Testumgebung angeglichen. Die Umsetzung dieser Schritte wird in den nächsten zwei Abschnitten ausgeführt. Alle Messungen der Signalstärke der verwendeten Funkverbindung werden dabei in Dezibel (dB) angegeben.

3.3.1.1 Auswahl des Propagierungsmodells

Zur Entwicklung des Positionierungssystems für den Empfänger muss zunächst entschieden werden, welche Funktechnologie für die Distanzbestimmung herangezogen wird. Das

kooperative Positionierungsverfahren in dieser Diplomarbeit verwendet dafür Wi-Fi Direct. Wi-Fi Direct erlaubt P2P-Verbindungen über weite Distanzen und benutzt dabei einen Sensor, der von vielen Menschen zur automatischen Verbindung ihres Smartphones mit lokalen Infrastrukturnetzen dauerhaft aktiviert gelassen wird. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion benachbarter Geräte.

Für die Positionierung werden - wie im letzten Kapitel erläutert - die Distanzen zwischen dem Empfänger und den Sendern benötigt. Die Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung zwischen Sender und Empfänger dient als Indikator der Distanz. Ein Propagierungsmodell legt durch eine Modellfunktion fest, in welchem Maß die Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung von der Distanz abhängig ist. Nach Bestimmung umgebungsabhängiger Parameter kann mit Hilfe dieser Modellfunktion die Distanz zu jedem verfügbaren Sender unabhängig bestimmt werden.

Die in der aktuellen Forschung etablierten Propagierungsmodelle wurden in Abschnitt 2.3 vorgestellt und erläutert. In dem in dieser Diplomarbeit entwickelten System kommt die folgende Modellfunktion zur Anwendung

$$SS(d) = P_r(d) = P_0 - PL(d) = P_0 - (40,054 + n * \log_{10}(d)) \text{ [dB]}. \quad (3.1)$$

Diese Modellfunktion entspricht dem nach Friis definierten Pfadverlust (vergleiche Abschnitt 2.2), allerdings mit einem variablen Faktor n . P_r bezeichnet dabei die beim Empfänger gemessene Leistung bzw. Signalstärke (SS) in dB in Abhängigkeit der Distanz d . Die Konstante 40,054 ergibt sich, wenn für die Übertragungsfrequenz in der Freiraumdämpfung nach Friis ein Wert von 2,4 Gigahertz angenommen wird, welcher der üblichen Übertragungsfrequenz für Wi-Fi Direct entspricht [4]. n ist eine empirische Konstante, die entsprechend der Umgebung gewählt wird. Da für diese Diplomarbeit keine Informationen über die Antenneneigenschaften der verwendeten Smartphones zur Verfügung standen, wird im weiteren Verlauf angenommen, dass die Antennengewinne und die transmissionierte Leistung konstant bleiben. Damit kann auch P_0 empirisch bestimmt werden. In 802.11 WLAN-Netzwerken besitzen diese Annahmen nach Mazuelas et al. auch Gültigkeit [20].

Die gegebene Modellfunktion 3.1 aus Abschnitt 3.3.1.1 ist für die Berechnung der Signalstärke für gegebene Distanzen ausgelegt. Das hier entwickelte Positionierungssystem soll jedoch die Distanz zwischen zwei verbundenen Geräten bestimmen. Dazu muss die Modellfunktion so umgestellt werden, dass die Distanz d aus der gemessenen Signalstärke SS ermittelt werden kann. Daraus ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift

$$d = 10^{\frac{P_0 - 40,054 - SS}{n}} \text{ [m]}. \quad (3.2)$$

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die noch unbestimmten Parameter n und P_0 in

Abhängigkeit von der Testumgebung festgelegt werden.

3.3.1.2 Trainingsphase

In der Trainingsphase sollen die noch unbestimmten Parameter n und P_0 der Modellfunktion so gewählt werden, dass sie im anschließenden Betrieb auf Eingabe der gemessenen Signalstärken in die Modellfunktion möglichst exakte Distanzwerte zurückgeben. Signalstärken von Funkverbindungen unterliegen jedoch in der Regel starken Störeinflüssen und können daher Werte aufweisen, die von Modellannahmen stark abweichen. Deshalb werden die Parameter anhand von Trainingsdaten bestimmt, die aus der gleichen Umgebung stammen, in der im späteren Verlauf dieser Arbeit das Gesamtsystem getestet werden soll. Die Trainingsdaten beinhalten Messpaare aus Signalstärke und einer durch eine alternative Methode bestimmten Distanz. Für die Distanzbestimmung wird in dieser Arbeit ein gewöhnliches Metermaß verwendet. Durch ein Minimierungsverfahren werden anschließend die Parameter so gewählt, dass die Fehlerquadrate zwischen den aus den Signalstärke berechneten Distanzen und den gemessenen Distanzen minimal wird.

Grundlage für die Trainingsmethode ist die Annahme, dass sich Signalstärken in bestimmten Abständen zum Sender vorhersagen lassen. Deshalb soll im nächsten Abschnitt zunächst die Aussagekraft der Signalstärke als Distanzindikator untersucht werden.

3.3.1.2.1 Reproduzierbarkeit von Wi-Fi Direct Signalstärken

Für die Untersuchungen der Reproduzierbarkeit von gemessenen Signalstärken einer Wi-Fi Direct Verbindung kommen zwei Samsung Galaxy Nexus Testgeräte (vergleiche Abschnitt 3.1.2) zum Einsatz. Zwischen diesen Testgeräten wird eine dauerhafte Wi-Fi Direct Verbindung aufgebaut. Ein Gerät übernimmt die Rolle des Senders - das andere die Rolle des Empfängers. Die Messungen der Signalstärke erfolgen in Distanzen in einem Intervall von einem Meter. Dabei wird darauf geachtet, dass stets Sichtkontakt zwischen den beiden Geräten besteht. Der maximale Messabstand beträgt ca. 20 Meter. Dies entspricht ungefähr der längsten Strecke mit Sichtkontakt in der Testumgebung (vergleiche Abbildung 3.1 in Abschnitt 3.1.1).

Verlauf der Wi-Fi Direct Signalstärken in einem Messpunkt

Neben dem distanzabhängigen Verhalten von Wi-Fi Direct Signalstärken ist auch das zeitliche Verhalten von Interesse. Deshalb werden die Signalstärken an jedem Messpunkt über einen längeren Zeitraum beobachtet. Für diese Untersuchung werden an jeder Messposition in der Testumgebung im Abstand von drei Sekunden insgesamt zehn Messungen aufgenommen. Während der Messungen befindet sich der Sender auf einem Tisch, während der

Empfänger ruhig in der Hand gehalten wird. Abbildung 3.11 zeigt die zehn aufeinanderfolgenden Messungen in einem Meter Abstand.

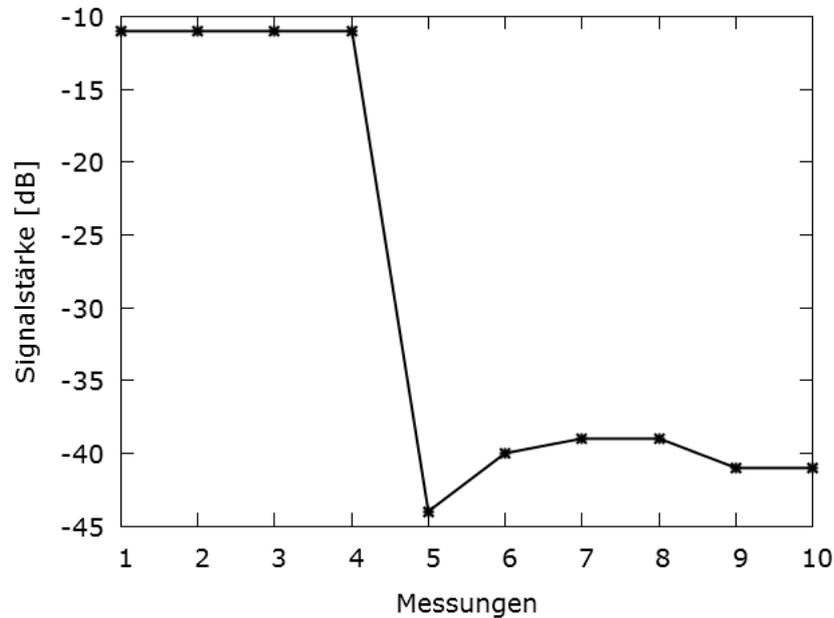


Abbildung 3.11: Wi-Fi Direct Signalstärken in einem Messpunkt

Der Verlauf der Signalstärke über die Zeit in Abbildung 3.11 zeigt, dass sich diese nicht konstant verhält. Während den ersten vier Messungen wird eine konstante Signalstärke von -11 dB festgestellt. Bei der fünften Probe, fällt der Wert der Signalstärke um ca. -33 dB ab. Danach beträgt der Werte für die restlichen Messungen ungefähr -40 dB. Eine Änderung der Umgebungsbedingungen während der Messungen konnte nicht festgestellt werden. Wiederholte Versuche zeigten ähnliche Sprünge an einer Stelle.

Wegen des wechselhaften Verhaltens von Signalstärken ist es daher immer ratsam, den Wi-Fi Direct Sensor mit der größtmöglichen Aktualisierungsrate auszuwerten und dabei mehrere aufeinanderfolgende Messungen zu betrachten. So können durch geeignete Aggregation der Daten Ausreißer besser kompensiert werden.

Verlauf der Wi-Fi Direct Signalstärken mit wechselnder Sichtbarkeit zwischen den Smartphones

Wi-Fi Direct besitzt auch die Möglichkeit, eine Verbindung zwischen Geräten bis zu gewissen Distanzen aufrechtzuerhalten, selbst wenn diese keinen direkten Sichtkontakt haben.

Besitzen zwei Geräte einen direkten Sichtkontakt, so spricht man von einem *Line-of-Sight* (LOS) Szenario. Ist der direkte Sichtkontakt dagegen nicht gegeben, so nennt man dies

ein *Non-Line-of-Sight* (NLOS) Szenario. Der Unterschied im Verlauf der Signalstärken einer Wi-Fi Direct Verbindung in einem LOS- und einem NLOS-Szenario sollen in diesem Abschnitt untersucht werden.

Zur Untersuchung der Wi-Fi Direct Signalstärken in den zwei Szenarien werden in den vier Fluren des unteren Quadranten der Testumgebung Signalwerte aufgenommen. Der Sender befindet sich auf einem Tisch an einer festen Position am Ende eines Ganges. Der Empfänger wird währenddessen in der Hand gehalten und in Abständen von je einem Meter weg vom Sender bewegt. Der Vorgang wird in den anderen drei Gängen wiederholt. Abbildung 3.12 veranschaulicht den Versuchsaufbau.

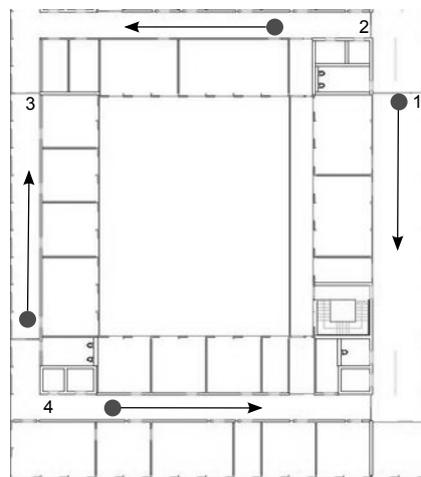


Abbildung 3.12: Aufnahmepositionen in der Testumgebung - LOS-Szenario

Die schwarzen Kreise im Bild der Testumgebung stellen die Senderpositionen in jedem der vier Flure dar. Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung der weiteren Aufnahmepositionen einer Messreihe bzw. die Bewegungsrichtung des Empfängers. An jeder Abstandsmarke wird erneut eine Serie von zehn aufeinanderfolgenden Signalwerten im zeitlichen Abstand von drei Sekunden aufgenommen. Die vier Grafiken 3.13, 3.14, 3.15 und 3.16 zeigen die Resultate der Messreihen für das LOS-Szenario. Jeder Messwert wird als einzelner Punkt visualisiert.

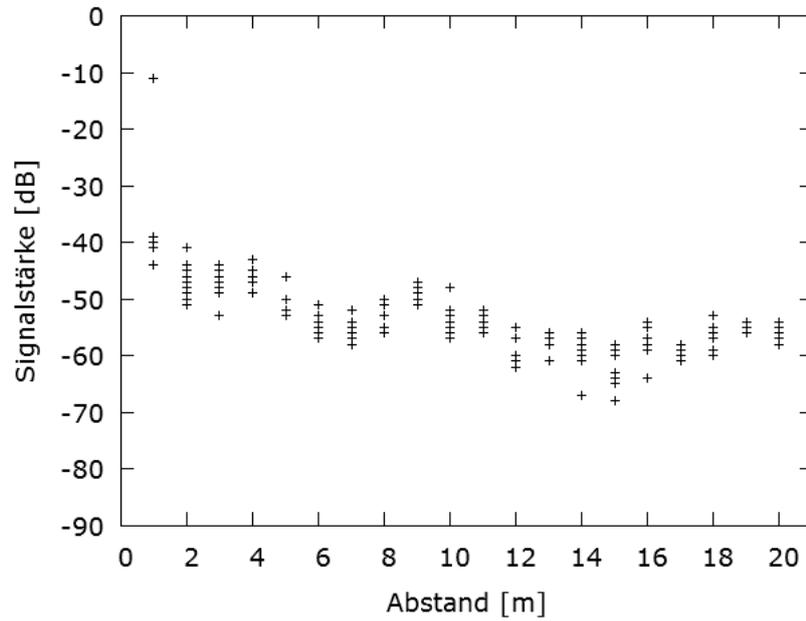


Abbildung 3.13: Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 1

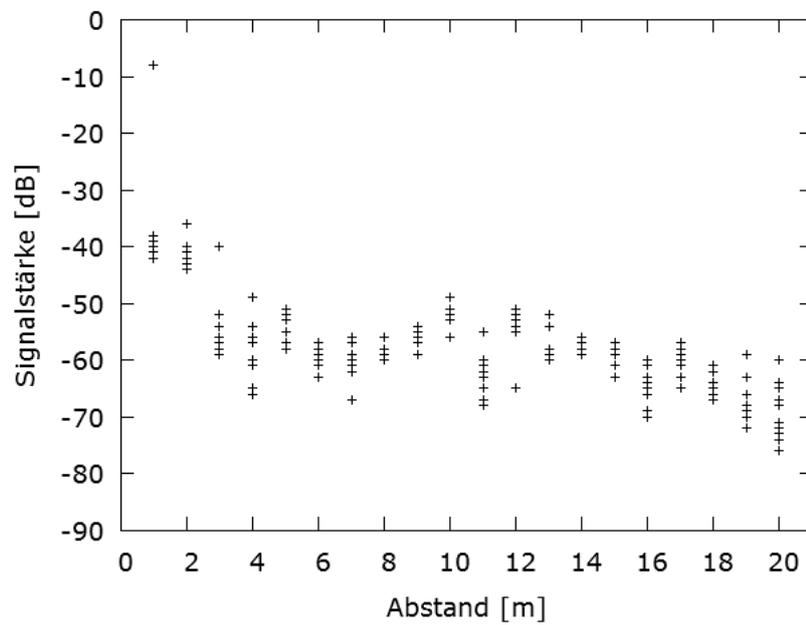


Abbildung 3.14: Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 2

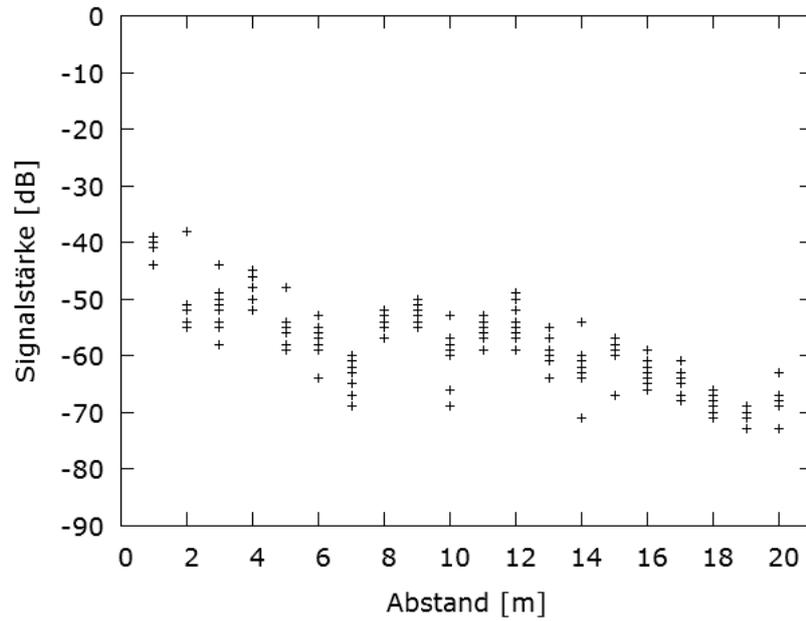


Abbildung 3.15: Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 3

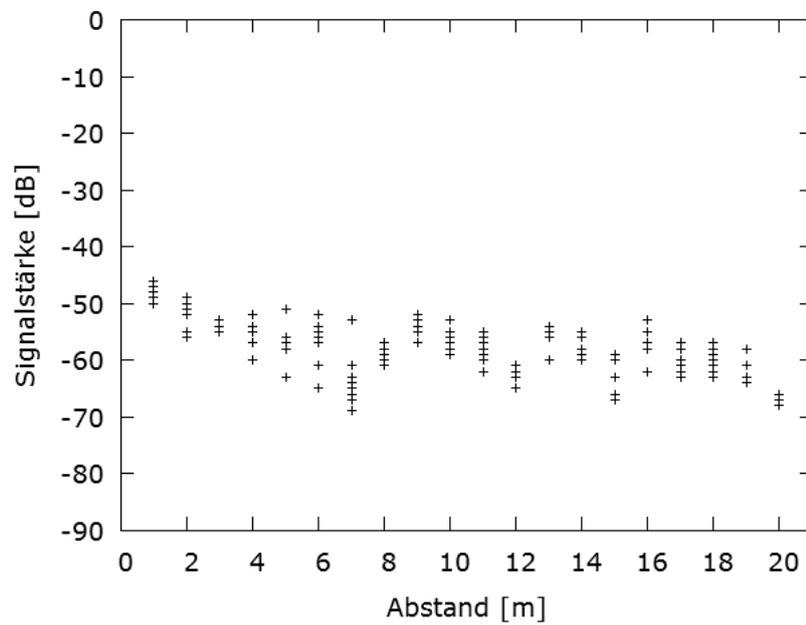


Abbildung 3.16: Wi-Fi Direct Signalstärken im LOS-Szenario - Flur 4

Aus den vier Abbildungen für das LOS-Szenario ist erneut zu erkennen, dass die Signalstärke an einem Ort bei unbewegten Geräten keineswegs konstant bleibt. Vielmehr unterliegt

sie an den meisten Stellen Schwankungen in der Größenordnung von 15 dB bis 20 dB. In der Nähe des Senders (bis zwei Meter) zeigen die Sensorwerte des Empfängers in zwei der vier Fällen außerordentlich hohe Signalstärken. Es gibt immer wieder Ausreißer wie beispielsweise in Abbildung 3.13 bei der Messung 1. Die Signalstärken liegen im Gesamten bis auf wenige Ausnahmen im Bereich zwischen -30 dB und -80 dB. Zum Vergleich folgen nun die Messwerte der Aufnahmepositionen im NLOS-Szenario. Abbildung 3.17 veranschaulicht den Versuchsaufbau für das NLOS-Szenario.

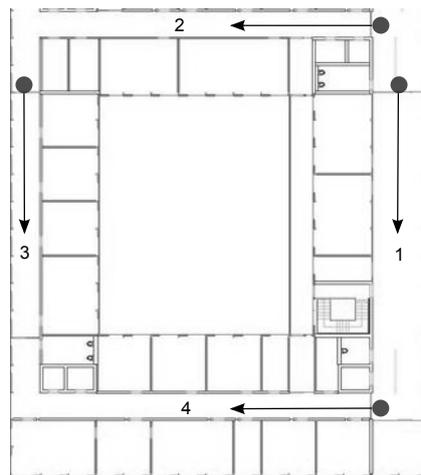


Abbildung 3.17: Aufnahmepositionen in der Testumgebung - NLOS-Szenario

Die schwarzen Kreise im Bild der Testumgebung stellen wieder die Senderpositionen in jedem der vier Flure dar, die sich in diesem Fall immer hinter Glastüren befinden. Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung des Empfängers und an jeder Abstandsmarke wird ebenfalls eine Serie von zehn aufeinanderfolgenden Signalwerten im zeitlichen Abstand von drei Sekunden aufgenommen. Die Grafiken 3.18, 3.19, 3.20 und 3.21 zeigen die Resultate der Messreihen für das NLOS-Szenario.

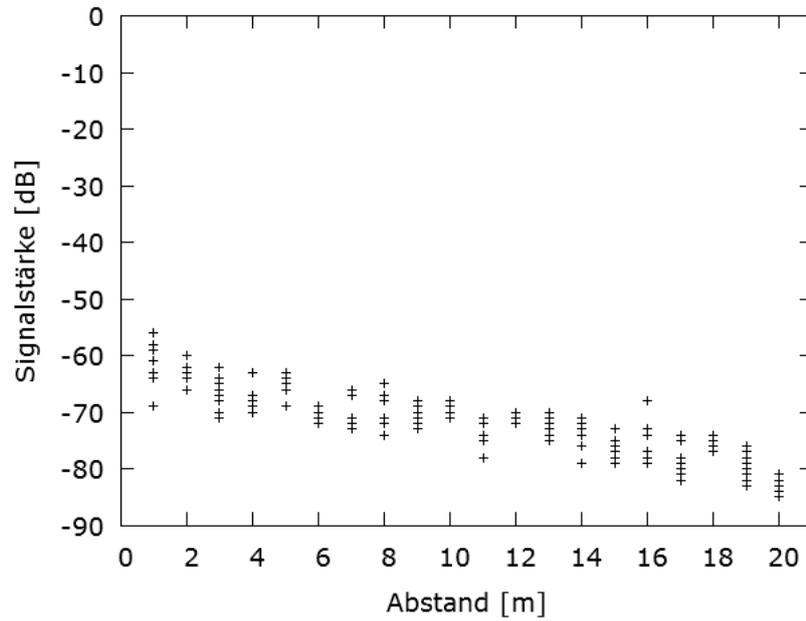


Abbildung 3.18: Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 1

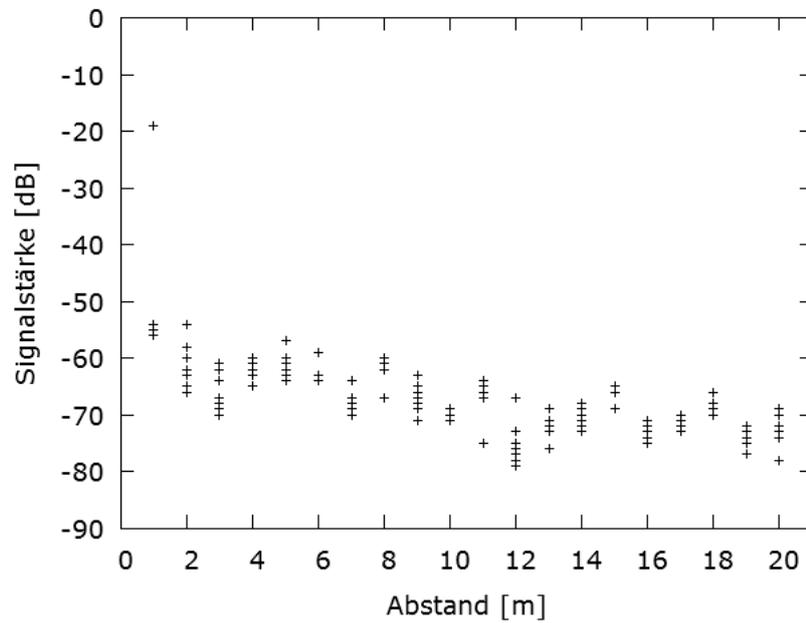


Abbildung 3.19: Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 2

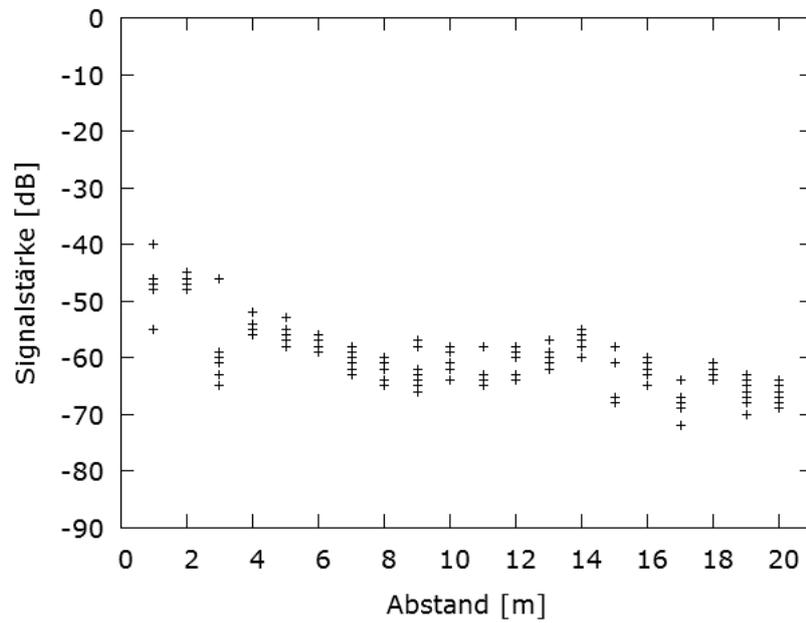


Abbildung 3.20: Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 3

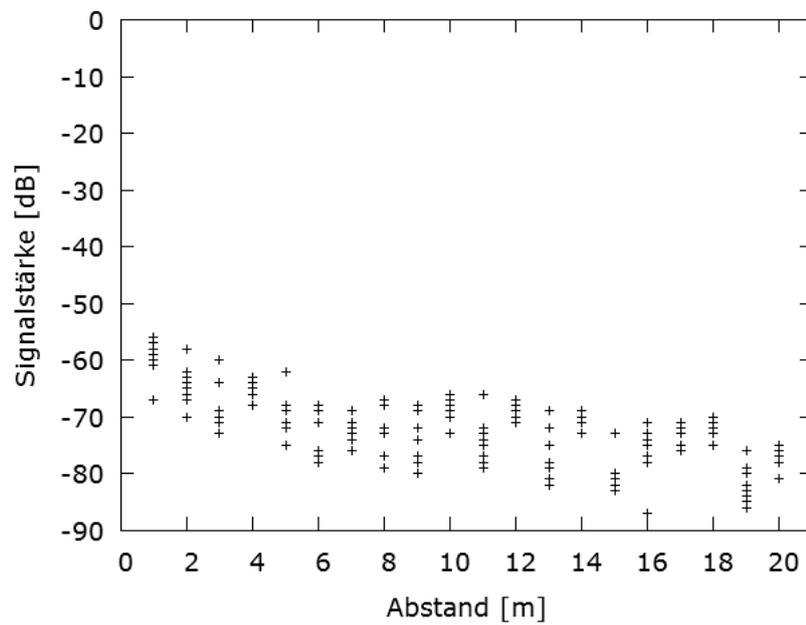


Abbildung 3.21: Wi-Fi Direct Signalstärken im NLOS-Szenario - Flur 4

Die Werte der Signalstärken im NLOS-Szenario zeigen ein ähnliches Verhalten wie bei LOS. Hier sind die Signalstärken jedoch im Gesamten etwas niedriger und liegen zwischen

-40 dB und -90 dB. Betrachtet man den Mittelwert über alle Signalstärken im LOS und NLOS-Szenario, so ergibt sich jeweils ein Wert von -56,5 dB bzw. -67,5 dB. Diese Differenz bestätigt, dass die Signalstärken im NLOS-Szenario im Allgemeinen niedriger sind als im LOS-Szenario.

Verhalten der Wi-Fi Direct Signalstärken in einem Messpunkt bei Änderung der Ausrichtung

Neben der Ortsabhängigkeit und der Zeitabhängigkeit der Wi-Fi Direct Signalstärken soll ferner auch der Einfluss der Lage des Geräts an einem festen Ort untersucht werden. Dazu werden erneut Messreihen mit festem Sender und beweglichem Empfänger durchgeführt. Die Aufnahmen für diese Untersuchung fanden ausschließlich im Flur mit der Marke 1 statt (siehe Abbildung 3.12 und 3.17). Erneut wird in jedem Ort und in jeder Lage eine Messreihe von zehn Werten mit einem Zeitabstand von drei Sekunden durchgeführt. Aus den zehn Werten einer Ausrichtung wird der Mittelwert gebildet und zur Analyse verwendet. Das Smartphone befindet sich dabei stets in einer horizontalen Lage, wie es typisch für die Verwendung als Navigationshilfe ist. Als Ausrichtungen werden dabei vier verschiedene Orientierungen gewählt, die um 90° zueinander (um die Körperachse des Menschen) gedreht sind. Die betrachteten Winkel sind somit 0° , 90° , 180° und 270° , wobei der Winkel 0° als Ausrichtung zum Sender festgelegt wird, die somit zu direktem Sichtkontakt zwischen den Testgeräten führt. Der Winkel von 180° ist dadurch die vom Sender abgewandte Ausrichtung, in welcher der menschliche Körper den direkten Sichtkontakt zwischen den Geräten blockiert. Die Signalstärken der verschiedenen Ausrichtungen sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Aus der Abbildung ist zu sehen, dass die blaue Linie der 180° Orientierung im Allgemeinen etwas niedrigere Signalstärken aufweist als die anderen Orientierungen. Eine mögliche Ursache ist die asymmetrische Empfangscharakteristik der Wi-Fi Antenne im Smartphone. Zusätzlich kann die Abschattung durch den Menschen eine Rolle spielen. Insgesamt liegen die mittleren Signalstärken der vier Orientierungen an einem Ort nicht weiter auseinander als die weiter oben gemessene Schwankung bei reinen LOS Szenarien ohne Lageänderungen. Die Lage des Smartphones wird deshalb im weiteren Verlauf der Arbeit nicht gesondert berücksichtigt. Die gleichen Beobachtungen konnten in einem von elektronischen Geräten befreiten Außenbereich reproduziert werden.

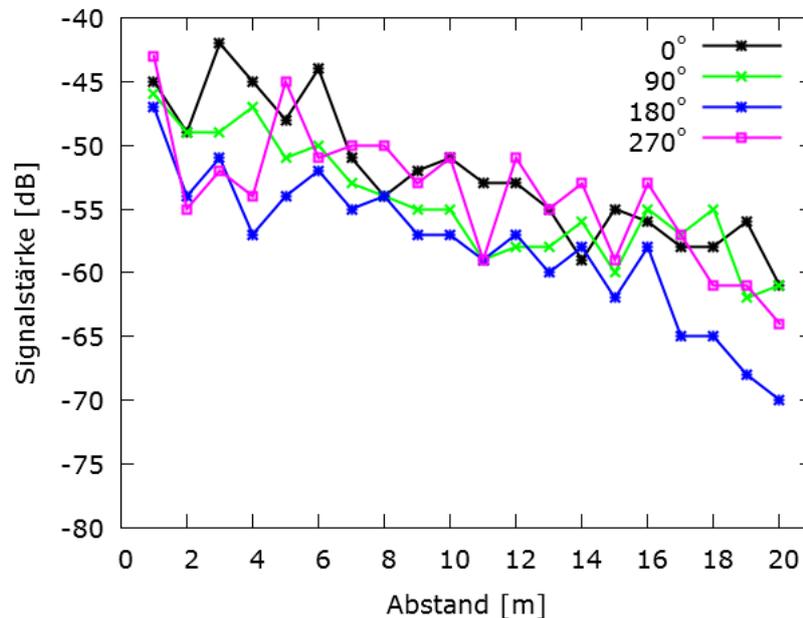


Abbildung 3.22: Wi-Fi Direct Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung

Verlauf der aggregierten Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierender Distanz

Das in dieser Diplomarbeit entwickelte kooperative Positionierungssystem beruht auf der Annahme, dass die Signalstärke einer Wi-Fi Direct Verbindung ein Indikator für den Abstand zwischen den verbundenen Geräten ist. Die Abbildungen 3.23, 3.24 und 3.25 zeigen den Mittelwert, das Maximum und den Median der jeweils zehn aufgenommenen Signalstärken pro Abstandsmarke im Flur mit der Marke 1 (siehe Abbildung 3.12 und 3.17). In den Abbildungen ist zu erkennen, dass nur bei Distanzen von ein bis zwei Metern eine äußerst hohe Signalstärke gemessen wird. Der Verlauf der Kurve für größere Abstände fällt flach ab, weist jedoch Schwankungen in der Größenordnung von 10 dB. Insbesondere fällt auf, dass die strenge Monotonie der Modellfunktion dadurch verletzt ist, d.h. eine Signalstärke kann aus diesen Graphen nicht genau einer Distanz zugeordnet werden. Dennoch können die Messwerte der Wi-Fi Direct Signalstärken als grober Indikator für Distanzen angesehen werden.

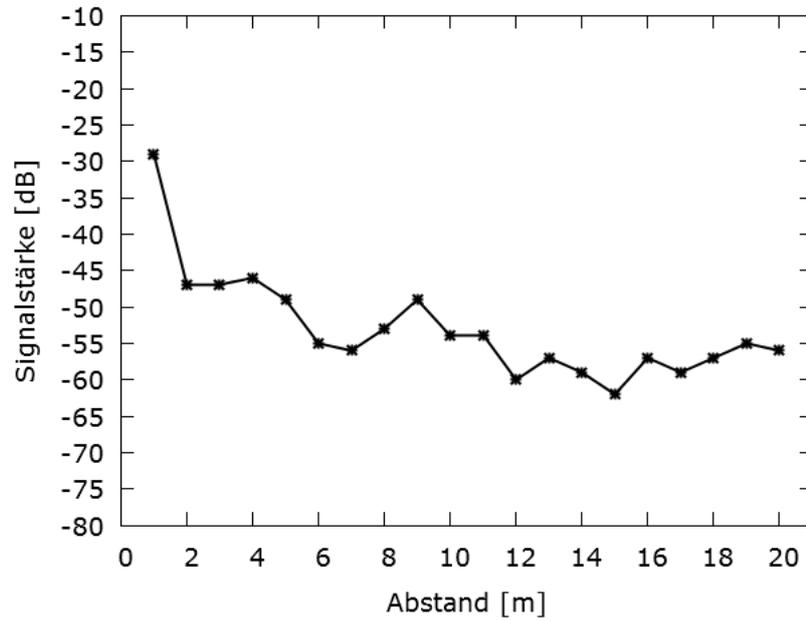


Abbildung 3.23: Mittelwert der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen

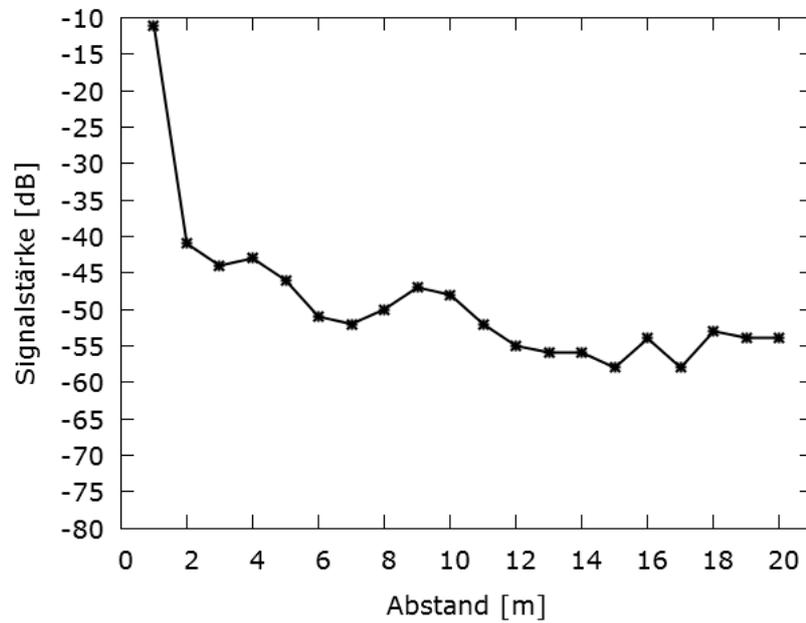


Abbildung 3.24: Maximum der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen

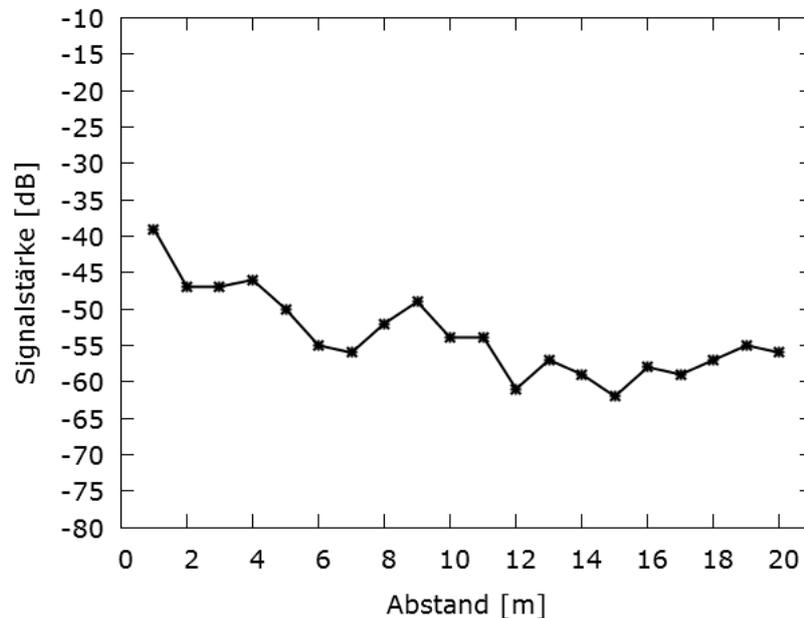


Abbildung 3.25: Median der Wi-Fi Direct Signalstärken bei variierenden Distanzen

3.3.1.2.2 Aufnahme und Speicherung der Trainingsdaten

Basierend auf den Erkenntnissen, die in den letzten Abschnitten gewonnen wurden, muss für die Speicherung von Trainingsdaten eine Datenstruktur entworfen werden. Zur Speicherung der Trainingsdaten kommt in dieser Arbeit eine SQL-Datenbank zum Einsatz. Die Entwicklung eines geeigneten Schemas ist Teil dieses Kapitels.

Wie bereits erwähnt ist es sinnvoll, mehrere Messwerte der Signalstärke in jeder Position zu berücksichtigen. Für die Testreihen bzw. die Aufnahme von Trainingsdaten beträgt die Anzahl der Werte pro Aufnahmeposition immer zehn - aufgenommen mit einem Zeitabstand von drei Sekunden. Da in dem Systemaufbau keine Topologie oder Geometrie des Gebäudes berücksichtigt wird, werden zur Bestimmung der Modellfunktion aus Trainingsdaten nur Messwerte von LOS Szenarien berücksichtigt. Wie weiter unten gezeigt wird, werden Verluste in der Signalleistung durch Blockade des Sichtkontakts später durch kooperative Ansätze kompensiert, so dass die Unterscheidung zwischen LOS und NLOS nicht mehr von Bedeutung ist. Die Ausrichtung des Smartphones gegenüber anderen Smartphones kann, wie im letzten Abschnitt erläutert, vernachlässigt werden. Die Auswirkungen der Ausrichtung sind von den sonstigen Störeinflüssen in der Signalstärke nicht zu unterscheiden. Ferner ist die Bestimmung der Ausrichtung mit der heute üblichen Hardware selbst sehr ungenau und resultiert nur in einer erhöhten Komplexität der Datenerfassung. Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen ergibt sich das Datenbanktabellenschema in Abbildung 3.26. Jeder Messpunkt entspricht einer Reihe in dieser Tabelle.

<code>_id</code>	<code>mac_address</code>	<code>x_coordinate</code>	<code>y_coordinate</code>	<code>meter</code>	<code>signal_strength</code>
------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------	------------------------------

Abbildung 3.26: Datenbankschema: Jedem Messpunkt wird eine eindeutige ID zugeteilt. Unter dieser werden die MAC-Adresse als Identifikation des Senders, die Position des Senders im Gebäude, der vorgegebene Abstand und die Signalstärke gespeichert.

`_id` bezeichnet den Primärschlüssel der Tabelle, der bei jeder Einfügeoperation automatisch inkrementiert wird. Die MAC-Adresse und die x -/ y -Koordinaten identifizieren den Sender und seine Position. In der Spalte `meter` steht die mit einer alternativen Methode ermittelte Distanz der aktuellen Messung. Die Spalte `signal_strength` hält die Werte des Wi-Fi Direct Sensors fest.

3.3.1.2.3 Bestimmung der unbekannt Parameter des Propagierungsmodells

Die in der Gleichung 3.2 aus Abschnitt 3.3.1.1 aufgestellte Abstandsfunktion d besitzt zwei unbekannt Parameter P_0 und n , deren Bestimmung nun erfolgt. Die dazu benötigten Trainingsdaten werden aus der oben eingeführten Datenbank geladen und in den Trainingsalgorithmus gegeben. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (vergleiche 2.4.2) werden dort die Werte der unbekannt Parameter so berechnet werden, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal ist. Der folgende Abschnitt erläutert die Einzelheiten.

Abstandsfunktion - Minimierung der Fehlerquadrate nach Gauß

Zur Bestimmung der freien Parameter durch Minimierung der Fehlerquadrate wird zunächst die zu minimierende Fehlerfunktion definiert. Der Fehler r eines Messpaares bezieht sich dabei auf die Differenz zwischen der aus der Modellfunktion berechneten Distanz \tilde{d} und der gemessenen Distanz d

$$r = \tilde{d} - d = 10^{\frac{P_0 - P_c - SS}{n}} - d \quad [m].$$

Dabei steht P_c für den konstanten Wert 40,054. Somit wird die Gesamtfunktion F der Fehlerquadrate für m Messwerte wie folgt definiert

$$F(P_0, n) = \sum_{i=1}^m r_i^2 = \sum_{i=1}^m (\tilde{d}_i - d_i)^2 = \sum_{i=1}^m \left(10^{\frac{P_0 - P_c - SS_i}{n}} - d_i \right)^2. \quad (3.3)$$

Der Parameter n bestimmt wie schnell die Signalstärken F bei Vergrößerung der Distanz abfallen. Dieser Parameter wird hier ebenfalls variiert und als maximal möglicher Wert 100

verwendet. Zur Vereinfachung des zweidimensionalen Minimierungsproblems wird der Wert n dazu in ganzzahligen Schritten verändert. Mit jedem Wert für n wird der nun einzige Parameter P_0 optimiert. Der kleinste Fehler aus der resultierenden Menge bestimmt das Paar aus n und P_0 .

Durch die Festsetzung von n lässt sich die Funktion auf eine für die Minimierung geeignete Form bringen

$$\begin{aligned} F(P_0, n) &= F(P_0) = \sum_{i=1}^m \left(10^{\frac{2(P_0 - P_c - SS_i)}{n}} - 2 * d_i * 10^{\frac{P_0 - P_c - SS_i}{n}} + d_i^2 \right) \\ &= \left(\sum_{i=1}^m 10^{\frac{-2*(P_c + SS_i)}{n}} \right) * 10^{\frac{2*P_0}{n}} - \left(2 * \sum_{i=1}^m d_i * 10^{\frac{-(P_c + SS_i)}{n}} \right) * 10^{\frac{P_0}{n}} + \left(\sum_{i=1}^m d_i^2 \right). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Die geklammerten Terme enthalten damit nur noch von P_0 unabhängige Anteile und können im Folgenden durch Abkürzungen a , b und c ersetzt werden. Die verkürzte Form für F lautet dann

$$F(P_0) = a * 10^{\frac{2*P_0}{n}} - b * 10^{\frac{P_0}{n}} + c. \quad (3.5)$$

Die Funktion F ist stetig und differenzierbar. Für das Minimum von F gilt dadurch folgende notwendige Bedingung

$$\frac{dF}{dP_0}(P_0) \stackrel{!}{=} 0. \quad (3.6)$$

Die Ableitung der Funktion F nach P_0 lautet

$$\frac{dF}{dP_0} = a * \frac{2 \ln(10)}{n} * 10^{\frac{2P_0}{n}} - b * \frac{\ln(10)}{n} * 10^{\frac{P_0}{n}}. \quad (3.7)$$

Nach der Bedingung in 3.6 muss gelten

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dP_0} &= a * \frac{2 \ln(10)}{n} * 10^{\frac{2P_0}{n}} - b * \frac{\ln(10)}{n} * 10^{\frac{P_0}{n}} \stackrel{!}{=} 0 \\ &\Leftrightarrow 2 * a * 10^{\frac{2P_0}{n}} = b * 10^{\frac{P_0}{n}} \\ &\Leftrightarrow 10^{\frac{P_0}{n}} = \frac{b}{2a} \\ &\Leftrightarrow P_0 = n * \log_{10} \left(\frac{b}{2a} \right). \end{aligned}$$

Durch Wiedereinsetzen der Ersetzungen a , b und c ergibt sich für P_0 folgende Berechnungs-

vorschrift

$$\begin{aligned}
P_0 &= n * \log_{10} \left(\frac{b}{2a} \right) \\
&= n * \log_{10} \left(\frac{2 * \sum_{i=1}^m d_i * 10^{\frac{-(P_c + SS_i)}{n}}}{2 * \sum_{i=1}^m 10^{\frac{-2(P_c + SS_i)}{n}}} \right) \\
&= n * \log_{10} \left(\frac{10^{\frac{P_c}{n}} * \sum_{i=1}^m d_i * 10^{\frac{-SS_i}{n}}}{\sum_{i=1}^m 10^{\frac{-2SS_i}{n}}} \right) \\
&= n * \log_{10} \left(10^{\frac{P_c}{n}} \right) + n * \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^m d_i * 10^{\frac{-SS_i}{n}}}{\sum_{i=1}^m 10^{\frac{-2SS_i}{n}}} \right) \\
&= P_c + n * \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^m d_i * 10^{\frac{-SS_i}{n}}}{\sum_{i=1}^m 10^{\frac{-2SS_i}{n}}} \right)
\end{aligned}$$

Für P_0 gibt es also genau eine Lösung, die Funktion F hat damit wiederum genau einen Extremwert. Da die Veränderung von P_0 in der ursprünglichen Modellfunktion einer vertikalen Verschiebung entspricht, ist klar, dass die Werte der Fehlerfunktion F für betragsmäßig große P_0 gegen positiv unendlich streben. Bei dem Extremwert kann es sich also nur um ein Minimum handeln. Der zu erwartende Wert von P_0 führt zu einer vertikalen Verschiebung der Modellfunktion, so dass die Kurve inmitten der Messdaten liegt. Mit dieser Erkenntnis kann nun P_0 und n für die Modellfunktion und eine gegebene Menge von Trainingsdaten bestimmt werden.

3.3.1.3 Visualisierung

Für die Validierung der Modellfunktion und den gesamten Trainingsprozess wurde im Laufe der Diplomarbeit eine Android-Applikation entwickelt, welche den Aufnahmeprozess der Trainingsphase steuert und die anschließende Positionierung durchführt. Dabei ist vor allem die Visualisierung der Positionierung von großer Bedeutung. Dazu wird dem Benutzer eine maßstabsgetreue, hochauflösende Gebäudekarte der Testumgebung aus Abbildung 3.1 auf dem Bildschirm des Smartphones angezeigt. Mit einfachen Fingergesten lässt sich die Karte verschieben und zoomen, so dass stets das gesamte Gebäude oder ein detaillierter Bereich

betrachtet werden kann. Runde Marker zeigen die Positionen aller Smartphones in der Karte an. Abstände lassen sich durch konzentrische Kreise um die Marker visualisieren.

Über die Benutzeroberfläche der Positionierungsanwendung kann der Benutzer den Betrieb steuern. Zu Beginn wird ausgewählt, ob das Smartphone als Sender oder Empfänger agiert. Im Empfängermodus wird eine Verbindung mit der Datenbank für Trainingsdaten aufgebaut. Je nach Modus werden über diese Verbindung Trainingsdaten in die Datenbank eingefügt oder die bestehenden Trainingsdaten zur Bestimmung der Modellfunktion geladen.

3.3.2 Positionierungsphase

Mit der im Abschnitt 3.3.1.1 definierten Modellfunktion 3.1 und dem Verfahren zur Bestimmung der freien Parameter ist es nun möglich, aus der Signalstärke einer Wi-Fi Direct Verbindung die Distanzen abzuschätzen. Die Untersuchungen der Reproduzierbarkeit von Signalstärken unter verschiedenen Bedingungen zeigten, dass von der Distanzbestimmung nur ein grober Schätzwert zu erwarten ist. In der Positionierungsphase geht es nun darum, darauf aufbauend ein Verfahren zu entwickeln, die Position eines Empfängers aus den Positionen mehrerer Sender abzuleiten und dabei durch Kooperation die Ungenauigkeiten der Distanzen zu kompensieren. Der gesamte Ablauf wurde in Abbildung 3.5 aus Abschnitt 3.2.2 bereits skizziert. In diesem Kapitel werden nun die einzelnen Verfahrensschritte entwickelt und detailliert beschrieben. Das restliche Kapitel widmet jedem Teilschritt einen eigenen Abschnitt.

3.3.2.1 Aufbau einer Funkverbindung zwischen den Smartphones

Der erste Schritt der Positionierungsphase beinhaltet das Aufsammeln der zur Positionierung benötigten Daten. Diese umfassen die Position der Sender, welche ihre Position bereits kennen. Zur Erfassung dieser Position wird zunächst der Wi-Fi Sensor aktiviert, um alle aktiven Geräte in Reichweite entdecken zu können. Anschließend stellt der Empfänger eine Anfrage an alle verfügbaren Geräte, in dem er versucht, eine Wi-Fi Direct Verbindung zu ihnen aufzubauen. Die Positionierungsanwendung in dieser Diplomarbeit bietet die Möglichkeit einer bidirektionalen Kommunikation zwischen verbundenen Geräten. Durch das einfache Protokoll ist aber prinzipiell ein unidirektionaler Kanal vom Sender zum Empfänger ausreichend, sofern der Empfänger den Kanal öffnen kann.

3.3.2.2 Nachrichtenaustausch

Nach dem Aufbau der Wi-Fi Direct Verbindungen zwischen dem Empfänger und den in Reichweite befindlichen Sendern kann eine Kommunikation zwischen diesen stattfinden. Jeder Sender sendet über eine akzeptierte eingehende Verbindung seine verfügbaren Daten. Diese beinhalten eine eindeutige Identifizierung des Geräts (MAC Adresse) und die aktuelle Position. Der Empfänger kennt die Anzahl an aufgebauten Verbindungen und leitet daraus die Anzahl der an der Positionierung teilnehmenden Sender ab. Zur einfacheren Evaluierung wartet der Empfänger in der Initialisierungsphase der Anwendung bis er von jedem Sender mindestens eine Nachricht bekommen hat, bevor er die weiteren Schritte der Positionierung durchläuft.

Die Sender sind währenddessen dafür verantwortlich, in kurzen Zeitintervallen, ihre Kennung und ihre Koordinaten an den Empfänger zu übertragen. Der Empfänger fügt zu den empfangenen Datenpaketen einen Zeitstempel und die Signalwerte des Wi-Fi Sensors hinzu. Die übertragene MAC-Adresse hilft dabei, einer empfangenen Nachricht den korrekten Signalwert zuzuordnen.

Die Positionierung des Empfängers erfolgt alle drei Sekunden, jedoch nicht bevor alle Sender ihre Positionen und Signalstärken zum ersten Mal verschickt haben. Der Zeitstempel einer Nachricht wird verwendet, um veraltete Nachrichten zu verwerfen. Sind aktuelle Nachrichten von allen Sendern vorhanden, erfolgt die Positionierung des Empfängers.

3.3.2.3 Berechnung der Distanzen

Im ersten Verarbeitungsschritt der Positionsdaten werden die gemessenen Signalstärken in Distanzen überführt. Dazu werden die rohen Sensorwerte in die Modellfunktion des Propagierungsmodells gegeben. Die Distanz d zum Sender i berechnet sich damit wie folgt

$$d_i = 10^{\frac{P_0 - 40,054 - SS_i}{n}} [m]. \quad (3.8)$$

Die Werte P_0 und n sind wie im Abschnitt 3.3.1.2 bestimmt. SS_i ist die dem Sender i zugeordnete Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung. Die Konstante 40,054 ergibt sich durch Einsetzung der Übertragungsfrequenz von 2,4 GHz in das Modell der Freiraumdämpfung.

3.3.2.4 Berechnung der Position

Nachdem der Empfänger die Distanzen zu mehreren Sendern mit bekannter Position kennt, kann er versuchen, seine eigene Position daraus abzuleiten. Die Berechnung der Position basiert also auf der Lateration. Jeder Sender lässt sich bei diesem zweidimensionalen Positio-

nierungsproblem als Kreis modellieren, dessen Zentrum die Position des Senders darstellt. Der Radius beschreibt die berechnete Distanz. Im Idealfall ist die Lösung des Problems die Menge der Punkte, die auf jeder Kreislinie enthalten sind - bei drei oder mehr Sendern also im Normalfall der einzige Schnittpunkt aller Kreise.

In Abschnitt 3.2.2 wurde bereits erläutert, dass die Lateration mit weniger als drei Sendern uneindeutig ist. Im Falle eines einzelnen Senders ist jeder Punkt auf der beschriebenen Kreislinie eine Lösung. Ein zusätzliches Kriterium ist notwendig, um die Position genauer festzulegen. Ein zweiter Sender hilft in diesem Fall nur bedingt. Eine eindeutige Lösung gibt es nur, wenn sich beide Kreise in genau einem Punkt berühren. Meistens gibt es hier zwei Schnittpunkte, wobei nicht zu unterscheiden ist, welches der Richtige ist. Sind die Distanzen fehlerbehaftet, kann es passieren, dass es gar keinen gemeinsamen Punkt gibt. Dennoch kann in allen Fällen natürlich eine grobe Positionierung erfolgen, indem eine sinnvolle Position aus dem Bereich der Sender gewählt wird. Je nach Wahl ergeben sich unterschiedliche maximale Fehler. Sind drei oder mehr Sender an der Positionierung beteiligt, gibt es einen eindeutigen Schnittpunkt, sofern die Sender nicht alle auf einer Geraden liegen. Diese besondere Konstellation ist jedoch in einem Gebäude mit langen Korridoren nicht zu vernachlässigen. Die Anordnung entlang einer Gerade kann jedoch leicht erkannt werden und in entsprechenden Gebäuden durch eine Anpassung des Verfahrens (z.B. geometrische Mittelwertbildung der beiden resultierenden Schnittpunkte) kompensiert werden.

Für die weitere Ausführung wird nun der Fall von drei oder mehr Sendern betrachtet. Im Idealfall reicht ein dritter Sender bereits aus, um die exakte Position zu bestimmen. Jeder weitere Sender liefert nur die redundante Information. In Abschnitt 3.3.1.2 wurde jedoch deutlich, dass die Signalstärke lediglich ein grober Indikator für die Distanz ist. In einem solchen System mit fehlerbehafteten Distanzmessungen bieten mehr als drei Sender die Möglichkeit entweder aus der Menge der Sender eine Untermenge zu wählen oder durch einen kooperativen Ansatz Eingabewerte zu verbessern bzw. anders mit anderer Gewichtung zu verrechnen. Dieser Ansatz wird im Weiteren verfolgt. Ziel ist es dabei durch kooperative Algorithmen den Gesamtfehler zu reduzieren. Dazu sollen redundante Eingabedaten verwendet werden, um den Fehler in Einzelwerten zu erkennen und wenn möglich zu reduzieren.

Abbildung 3.27 und 3.28 zeigen zwei Beispiele mit drei Sendern. Die korrekte Empfängerposition ist durch einen Punkt markiert.

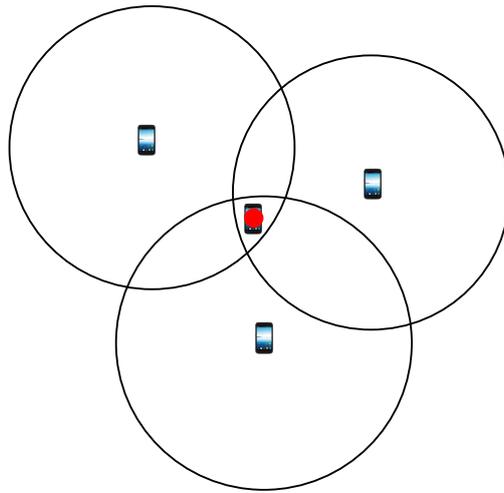


Abbildung 3.27: Trilateration mit fehlerhaften Distanzberechnungen. Je zwei Kreise schneiden sich. Alle Distanzen sind etwas zu groß abgeschätzt. Die echte Position passt jedoch zu allen Vorgaben recht gut.

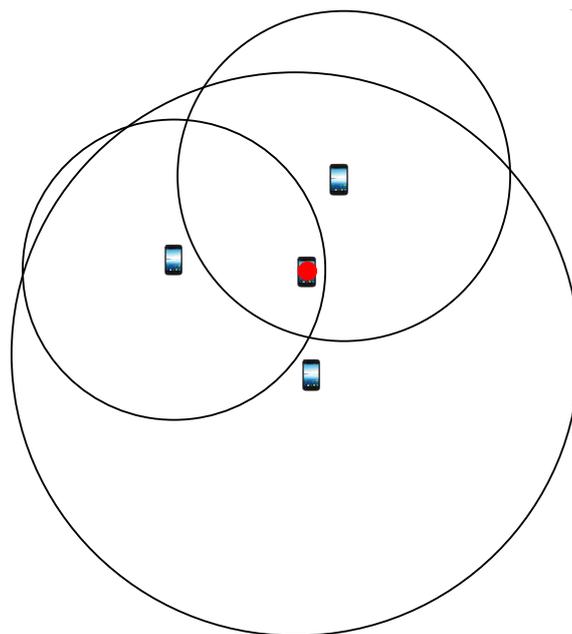


Abbildung 3.28: Trilateration mit fehlerhaften Distanzberechnungen. Je zwei Kreise schneiden sich. Die echte Position passt nur zu der Vorgabe eines Senders einigermaßen.

Für eine robuste Bestimmung der Position wird nach Punkten gesucht, die am besten zu den vorgegebenen Distanzen passen. Hierzu bietet sich erneut die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (vergleiche Abschnitt 2.4.2) als ein Lösungsansatz an. Diese ermöglicht die Suche nach den unbekanntenen Koordinaten x und y der Empfängerposition, die zu den

gegebenen Positionen und Distanzen der Sender einen minimalen Fehler aufweisen. Die Fehler r_i einer Position bezüglich eines Senders i werden dazu als Differenz zwischen der tatsächlichen Distanz $\tilde{d}_i = \tilde{d}_i(x, y)$ und der vorgegebenen Soll-Distanz d_i definiert

$$r_i = (\tilde{d}_i - d_i) = (\tilde{d}_i(x, y) - d_i). \quad (3.9)$$

Die Gesamtfehlerfunktion $F(x, y)$ für M Sender ist dann gegeben durch

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^M r_i^2 = \sum_{i=1}^M (\tilde{d}_i - d_i)^2 = \sum_{i=1}^M (\tilde{d}_i(x, y) - d_i)^2. \quad (3.10)$$

Die Ist-Distanz \tilde{d}_i stellt den euklidischen Abstand zwischen dem aktuell betrachteten Punkt mit den Koordinaten x und y und den empfangenen Koordinaten x_i und y_i des Senders dar. Die Soll-Distanz d_i ist die Distanz zwischen Empfänger und Sender, welche durch das Propagierungsmodell anhand der Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung berechnet wurde. Abbildung 3.29 zeigt grafisch welche Distanzen in der Fehlerfunktion verwendet werden.

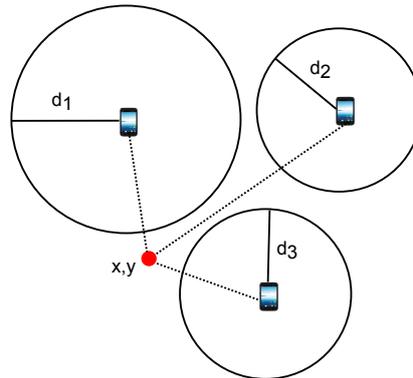


Abbildung 3.29: Verwendete Distanzen in der Fehlerfunktion. Sowohl die anhand des Propagierungsmodells berechneten Distanzen als auch die Distanzen zwischen einem betrachteten Punkt und den Koordinaten der Sender fließen in die Fehlerfunktion ein. Die berechneten Distanzen sind durch durchgezogene Linien dargestellt, während gestrichelte Linien die Distanzen zwischen dem Beispielpunkt und den Sendern visualisiert.

Für 3.10 ergibt sich mit dem euklidischen Abstand

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^M r_i^2 = \sum_{i=1}^M \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2. \quad (3.11)$$

Die Fehlerquadrate r_i^2 bzw. Fehler der Fehlerfunktion $F(x, y)$ nehmen bei einem betrach-

teten Punkt auf der Kreislinie den Wert Null an. Betrachtet man den Summand eines einzelnen Senders gilt für alle Punkte auf der Kreislinie um diesen Sender $\tilde{d}_i = d_i$. Der Fehler steigt für Punkte außerhalb des jeweiligen Kreises mit zunehmendem Abstand an. Innerhalb der Kreislinie steigt der Wert der Fehlerfunktion ebenfalls. Der Mittelpunkt des Kreises stellt ein lokales Maximum dar. Abbildung 3.30 veranschaulicht in welche Richtungen die Fehler ansteigen.

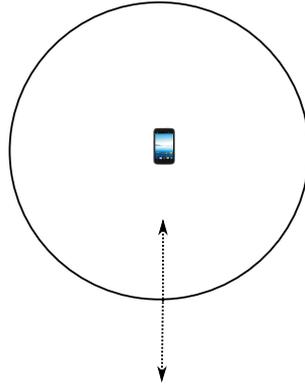


Abbildung 3.30: Fehler außerhalb und innerhalb eines Kreises. Punkte auf der Kreislinie weisen keinen Fehler auf. Die gestrichelten Linien zeigen die Richtungen des Anstiegs. Der Verlauf der Fehlerfunktion ist punktsymmetrisch zur Position des Senders.

Die Fehlerfunktion $f_i(x, y) = \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2$ für jeden der Sender i weist entlang eines Strahles beginnend am Mittelpunkt einen parabelförmigen Verlauf auf. Der Verlauf der Gesamtfehlerfunktion ergibt sich durch additive Überlagerung mehrerer solcher Funktionen. Zur einfachen Veranschaulichung des Verlaufes der Fehlerfunktion $F(x, y)$ betrachte man den Fall, dass sich alle verfügbaren Sender auf der x-Achse befinden, d.h. für die y-Koordinate gilt $y = 0$. Die einzelnen Fehlerfunktionen der Sender sowie die Summe dieser sind in der Abbildung 3.31 als Funktion über den x-Wert dargestellt. Aus der Abbildung ist zu sehen, dass der Verlauf von $f_i(x, y)$ sich aus zwei Parabelstücken zusammensetzt. Die beiden Nullstellen zeigen die x-Koordinaten, in denen die Fehlerfunktion den Wert Null annimmt. Das lokale Maximum zwischen den Nullstellen entsteht im Mittelpunkt des jeweiligen Kreises der x-y-Projektion. Die Summe der drei Fehlerfunktionen ergibt die Gesamtfehlerfunktion $F(x, y)$. Diese besteht aus vier zusammengesetzten Parabelstücken und einem globalen sowie drei lokalen Minima.

Für die Bestimmung der gesuchten Position des Empfängers nach der Methode der kleinsten Quadrate wird das Minimum der Fehlerfunktion $F(x, y)$ gesucht. Die Funktion F ist im gesamten Definitionsbereich stetig. In der ersten Ableitung ist jeder Summand genau dann undefiniert, wenn x und y der Position des zugehörigen Senders entsprechen. Damit

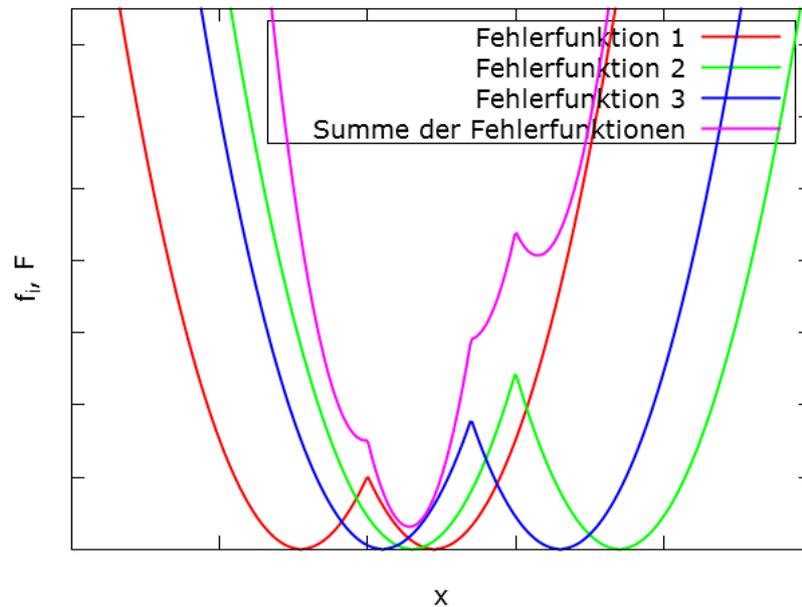


Abbildung 3.31: Verlauf der einzelnen Fehlerfunktionen von drei Sendern sowie der Summe dieser Fehlerfunktionen. Die Summe einzelner Fehlerfunktionen der Sender bestimmt den Verlauf der gesamten Fehlerfunktion $F(x, y)$.

ist die Funktion F ausschließlich in den Senderpositionen nicht differenzierbar. Diese lokale Maxima einzelner Summanden sind für die Bestimmung von Minima aber nicht von Bedeutung. Die notwendigen Bedingungen für ein Minimum von $F(x, y)$ lauten

$$\frac{dF}{dx} \stackrel{!}{=} 0$$

$$\frac{dF}{dy} \stackrel{!}{=} 0.$$

Die partiellen Ableitungen von $F(x, y)$ nach jedem der Parameter berechnen sich zu

$$\frac{dF}{dx} = \sum_{i=1}^M \frac{(x - x_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \quad (3.12)$$

und

$$\frac{dF}{dy} = \sum_{i=1}^M \frac{(y - y_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}. \quad (3.13)$$

3.3.2.4.1 Positionierung mit dem Gauß-Newton-Verfahren

In dieser Diplomarbeit wird zur Minimierung der Fehlerfunktion $F(x, y)$ bzw. zur Suche der Koordinaten x und y das Gauß-Newton Verfahren (vergleiche Abschnitt 2.4.3) verwendet. Eine analytische Bestimmung der Lösungen für $M > 2$ ist ohne Weiteres nicht möglich. Deshalb wird zur Bestimmung der Lösung ein numerisches Verfahren, das Gauß-Newton Verfahren verwendet.

Das Gauß-Newton Verfahren benötigt neben der Aufstellung der zu minimierenden Fehlerfunktion auch die Angabe einer Startposition. Danach erfolgt die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate, indem ausgehend von der Startposition iterativ eine bessere Lösung ermittelt wird. Die Berechnung der Position des Empfängers besteht daher aus den in Abbildung 3.32 dargestellten drei Schritten.

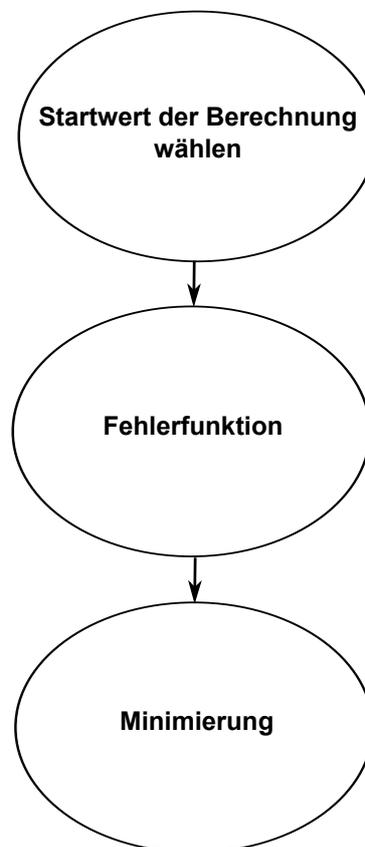


Abbildung 3.32: Ablauf der Positionierung in drei Schritten

Das Gauß-Newton ist ein iteratives Verfahren zur Lösung nichtlinearer Ausgleichsprobleme. Die Idee dabei ist, dass ausgehend von einer Position iterativ die nächst-bessere Lösung bestimmt wird. Die Bestimmung unbekannter Parameter bei nichtlinearen Ausgleichsproblemen erfolgt wie bei der Methode der kleinsten Quadrate über die Minimierung der

Summe von quadratischen Abweichungen r_i^2 .

Das Gleichungssystem mit den unbekanntem Parametern x und y , den Ist-Distanzen \tilde{d}_i und den Soll-Distanzen d_i liefert die zu minimierende Fehlerfunktion $F(x, y)$

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^M r_i^2 = \sum_{i=1}^M \left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i \right)^2.$$

Bei der Fehlerfunktion F handelt es sich um eine auf dem gesamten Definitionsbereich stetigen Funktion. Ferner ist sie mit Ausnahme der Senderpositionen differenzierbar. An den Senderpositionen führt je ein Summand der partiellen Ableitung dazu, dass die Differenzierbarkeit verloren geht (vergleiche Abbildung 3.31 in Abschnitt 3.3.2.4 mit Knick in Funktion). Die Definitionslücke der partiellen Ableitung können geschlossen werden, indem der entsprechende Summand für diese Stelle zu 0 definiert wird. Damit bestimmen die Summanden der anderen Sender in diesen Punkten den Gradienten der Fehlerfunktion.

Die Komplexität der Berechnung des Verfahrens hängt in erster Linie von der Anzahl der zu bestimmenden Parametern ab. Für das oben formulierte Ausgleichsproblem sind die zu bestimmenden Parameter die Empfänger position x und y . Dadurch sind die Berechnungsschritte auf einfache Matrixoperationen zurückzuführen.

Die Iterationsvorschrift des Gauß-Newton-Verfahrens ausgehend von einer Position $a^{(i)}$ lautet

$$a^{(i+1)} = a^{(i)} - (J(a^{(i)})^T * J(a^{(i)}))^{-1} * J(a^{(i)})^T * r(a^{(i)}) \quad (3.14)$$

dabei entspricht $a^{(i)}$ hier der i -ten Verbesserung des zweielementigen Positionsvektors $(x, y)^T$. Die Startposition wird in dieser Nomenklatur als $a^{(0)}$ angegeben.

Der Residuenvektor r berechnet sich aus der Differenz zwischen den Ist- und Soll-Distanzen

$$r(x, y) = \begin{pmatrix} \tilde{d}_1(x, y) - d_1 \\ \vdots \\ \tilde{d}_M(x, y) - d_M \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

J ist die Jacobi-Matrix. Sie enthält die partiellen Ableitungen der M Residuen nach den beiden Parametern x und y und ist definiert als

$$J(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{dr_1}{dx}(x, y) & \frac{dr_1}{dy}(x, y) \\ \vdots & \vdots \\ \frac{dr_M}{dx}(x, y) & \frac{dr_M}{dy}(x, y) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

mit

$$\frac{dr_i}{dx}(x, y) = \frac{(x - x_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \quad (3.17)$$

$$\frac{dr_i}{dy}(x, y) = \frac{(y - y_i)}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}. \quad (3.18)$$

Die benötigten Matrixoperationen der Iterationsvorschrift stellen sich in diesem Fall als sehr einfach heraus. Die Jacobi-Matrix ist für M Sender eine $(M \times 2)$ Matrix. Die Multiplikation mit der transponierten Jacobi-Matrix ergibt damit eine (2×2) Matrix. Diese zu invertieren bedarf keiner besonderer Algorithmen.

Die Iteration wird solange wiederholt, bis eine Konvergenz erkannt wird. Das Konvergenzkriterium beim Gauß-Newton-Verfahren lautet $\|a^{(i+1)} - a^{(i)}\| < \epsilon$ für eine gegebene Fehlerschranke ϵ . Um eine Blockierung der Positionierungsanwendung zu vermeiden, wird zusätzlich die Anzahl der Iterationen beschränkt. Da es bei der gegebenen Fehlerfunktion zu oszillierendem Verhalten kommen kann, wird bei Erreichen der Maximalposition die Historie der Position überprüft und die beste Lösung daraus gewählt.

Abbildung 3.33 zeigt ein Beispiel wie sich das Gauß-Newton-Verfahren ausgehend von der realen Position als Startposition, iterativ zur gesuchten Lösung annähert. Das Diagramm zeigt eine x-y-Projektion der Testumgebung. Die Empfängerposition ist als roter Punkt eingezeichnet. Die Positionen der Sender sind als blaue Punkte - ihre realen Distanzen zum Empfänger als blaue Kreise in der Abbildung 3.33 abgebildet. Die schwarzen Kreise veranschaulichen die mit dem ausgewählten Propagierungsmodell geschätzten Distanzen, nach denen sich der Empfänger positionieren soll. Als Startposition für das Gauß-Newton-Verfahren wird in diesem Fall die reale Aufnahmeposition gewählt. Die geschwungenen, blassen Linien sind sogenannte Isolinien. Sie visualisieren Bereiche mit gleichen Werten der Fehlerfunktion $F(x, y)$. Sie helfen den Verlauf der zweidimensionalen Fehlerfunktion zu verstehen. Folgt man einer Isolinie, so ändert sich der Fehler nicht. Bewegt man sich dagegen quer zur Isolinie wird der Fehler größer oder kleiner. Da die Optimierungsrichtung des Gauß-Newton-Verfahrens durch die Jacobi-Matrix bestimmt ist, kann man so mit Hilfe des Diagramms bereits abschätzen, wie der Korrekturvektor in verschiedenen Bereichen der Testumgebung gerichtet ist. In diesem Diagramm werden Isolinien mit einer Schrittweite von 20 bis zu einem Fehlerwert von 1000 dargestellt, wodurch Bereiche fernab der Sender durch ihren großen Fehlerwert als weiß erscheinen.

Isobereiche, die keine weiteren Isolinien enthalten, stellen Extremwerte der Fehlerfunktion dar. Zwei lokale Minima sieht man in diesem Beispiel an den Schnittpunkten der drei Kreise. Hier verschwindet der Fehler. Verfolgt man von einem Minimum aus eine Linie zum rechten Sender, so kreuzt man ca. 18 Isolinien. Der Bereich um den rechten Sender

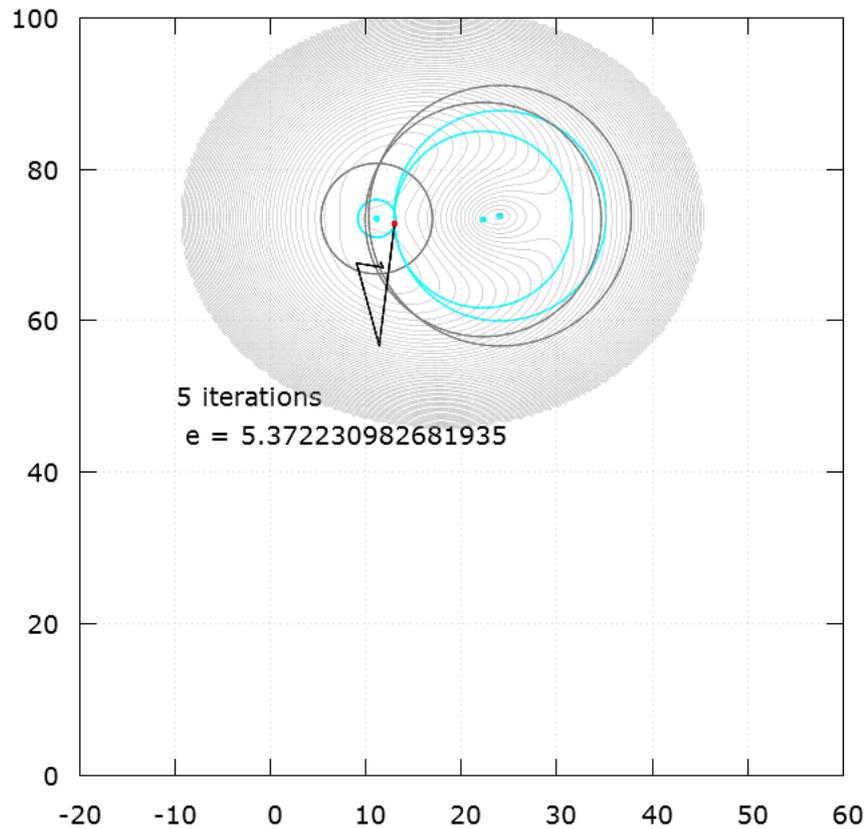


Abbildung 3.33: Iterationen des Gauss-Newton-Verfahrens mit drei Sendern und einem Empfänger

stellt ein lokales Maximum dar. Geht man gedanklich weiter nach rechts, kreuzt man bereits gekreuzte Isolinien - der Fehlerwert muss hier also wieder sinken, was durch die Annäherung an zwei der drei Kreislinien nachvollziehbar wird. Der größere, freie Bereich rechts der Sender stellt also ein weiteres lokales Minimum dar, dessen Fehlerwert jedoch deutlich über den Minima in den Schnittpunkten liegt. Es ist jedoch wichtig zu wissen, dass durch das Gauß-Newton-Verfahren nur ein lokales Minimum gefunden werden kann. Welche das ist, hängt stark von der Startposition ab. Ist keine ungefähre Position bekannt, kann zur Not das Verfahren mit verschiedenen Startpositionen wiederholt werden.

Im gezeigten Beispiel konvergiert das Verfahren nach fünf Iterationen und weist einen

Fehler von etwas mehr als 5 Metern zu der realen Position auf. Die Iterationsschritte sind als schwarzer Linienzug in das Diagramm gezeichnet.

3.3.2.4.2 Optimierungen der kooperativen Positionierung

Eine Positionierung mit dem Gauß-Newton-Verfahren ermittelt stets die Koordinaten x und y , in denen ein Minimum der Fehlerfunktion $F(x, y)$ vorliegt. Im idealen Fall gibt es nur ein Minimum, das genau an der Position des Empfängers liegt. Sind die Eingabegrößen jedoch fehlerbehaftet, so können mehrere lokale Minima entstehen. Das Verfahren konvergiert dann zu einer ebenfalls fehlerbehafteten Position. Will man das Positionierungsverfahren verbessern, muss man also dafür sorgen, dass die Eingabegrößen und die Fehlerfunktion so angepasst werden, dass sich das globale Minimum zur Empfängerposition verschiebt. Die nächsten Abschnitte führen solche Optimierungen ein. In der Evaluation wird der Einfluss der Optimierungen auf die Positionierung detailliert untersucht.

Grundsätzlich basieren alle Optimierungen auf dem Ansatz, dass in einer Umgebung mit vielen Sendern entweder eine geeignete vertrauenswürdige Untermenge gewählt werden kann oder die gesamte Menge verwendet wird, um Inkonsistenzen in den Eingabedaten aufzudecken und damit Fehler zu kompensieren. Wegen des einfachen Protokolls, dass dafür sorgt, dass alle zur Berechnung benötigten Daten beim Empfänger gesammelt werden, ist dieser in der Lage die Optimierungen ausschließlich lokal zu berechnen. Es ist also kein weiterer Kommunikationsaufwand erforderlich.

Für die Entwicklung der Optimierungen wurden einige Beispielszenarien aufgenommen und in Diagrammen wie in Abbildung 3.33 aus Abschnitt 3.3.2.4 visualisiert. Dadurch ist es möglich, genau nachzuvollziehen, wieso eine Positionierung erfolgreich oder fehlerhaft verläuft. In der unoptimierten Implementierung ist dabei schnell zu erkennen, dass nahezu alle Distanzberechnungen zu große Werte liefern. Aufgrund des charakteristischen Verlaufs der Modellfunktion kann damit gesagt werden, dass die gemessenen Signalstärken prinzipiell kleiner als erwartet sind. Dies soll als Grundannahme in die folgenden Optimierungen einfließen. Warum diese Annahme legitim ist, soll hier zunächst begründet werden. Einerseits ist klar, dass ein Empfänger in einem Punkt niemals mehr Leistung als die durch die Sendeleistung bedingte Maximalleistung messen kann. Werden zu große Signalstärken gemessen, beruht das Propagierungsmodell auf empirischen Annahmen. Man kann jedoch immer ein theoretisches Ausbreitungsmodell wählen, um die obige Annahme sicherzustellen. In der Trainingsphase wurde die Distanzmessung mit Messwerten des LOS-Szenarios kalibriert. Da in der Testumgebung aber mit verschiedenen Störeinflüssen wie Abschattung, Dämpfung oder Interferenz zu rechnen ist, fallen die gemessenen Signalstärken vergleichsweise niedrig aus. Insbesondere bei NLOS-Übertragungen ist mit dieser Auswirkung zu rechnen. Durch das in Abschnitt 3.3.1.2 beschriebene Kalibrierungsverfahren wird die Modellfunktion so dimensioniert, dass sie Fehler in den Distanzen der Trainingsdaten minimiert.

Durch die Streuung der gemessenen Signalstärken für eine Distanz liegen die Messpunkte im Gesamten sowohl oberhalb als auch unterhalb der Modellfunktion. Es ist also nicht ausgeschlossen, dass einzelne Messwerte für die gegebene Distanz zu große Signalstärken aufweisen. Jedoch haben diese aufgrund des exponentiellen Verlaufs der Modellfunktion einen weitaus kleineren Einfluss auf die Distanz als zu kleine Signalstärken.

Aus der obengenannten Annahme lässt sich eine weitere Grundüberlegung ableiten, die besagt, dass den Sendern mit kleinen Distanzwerten grundsätzlich eine höhere Aussagekraft zugeordnet wird als den Sendern mit großen Distanzwerten. Dies lässt sich mit der Propagierungsmodellfunktion 3.1 aus Abschnitt 3.3.1.1 herleiten. Je größer die Distanz, desto flacher ist die Modellfunktion, weshalb die Eindeutigkeit der invertierten Modellfunktion abnimmt. Durch die Schwankungen in der Signalstärke ist die Injektivität der Modellfunktion nicht mehr gegeben. Abbildung 3.23 aus Abschnitt 3.3.1.2 zeigt, wie verschiedene Signalstärken für mehrere Distanzen auftreten können. Ferner können hohe Signalstärken nur in der unmittelbaren Nähe eines Senders gemessen werden während niedere Signalstärke in allen Bereichen auftreten können.

Mit diesen Grundsatzüberlegungen sollen nun Optimierungen für die Positionierung hergeleitet werden.

Erster Optimierungsansatz der kooperativen Positionierung

Der erste Optimierungsansatz der kooperativen Positionierung verwendet eine einfache geometrische Überlegung, um die Fehler der Distanzwerte einzelner Sender zu verbessern. Zur Optimierung werden neben den berechneten Distanzen zwischen Empfänger und Sender auch die Distanzen zwischen den Sendern herangezogen. Dazu berechnet der Empfänger den euklidischen Abstand zwischen den empfangenen Positionen der Sender. Für die Optimierung werden alle Sender paarweise betrachtet und ihre Distanzen auf Konsistenz geprüft. Im Folgenden sei der Abstand zwischen Sender i und Sender j definiert als d_{ij} . Die vom Empfänger mit dem Propagierungsmodell und den Signalstärken berechneten Distanzen zu den Sendern seien d_i bzw. d_j . In Abbildung 3.34 sind die Distanzen zwischen allen an der Positionierung beteiligten Smartphones dargestellt.

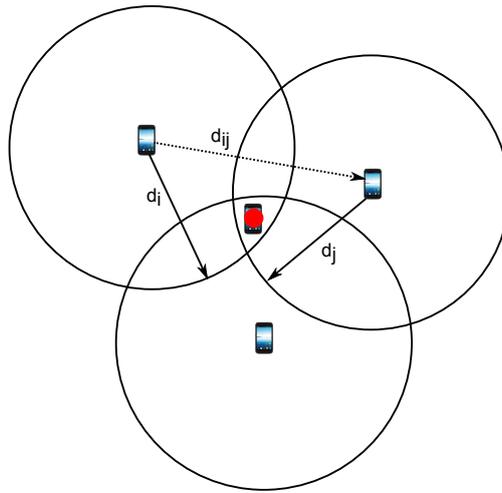


Abbildung 3.34: Visualisierung der Distanzen zwischen je zwei Sendern sowie die Distanzen der jeweiligen Sender zum Empfänger zur Optimierung der Positionsberechnung. Der mit einem Punkt markierte Empfänger überprüft die potentiell fehlerhaften Werte auf Konsistenz.

Der Empfänger und die beiden Sender bilden ein Dreieck mit den drei Distanzen als Kantenlängen. Abbildung 3.35 zeigt ein solches Dreieck, wie es im konsistenten Fall aussieht.

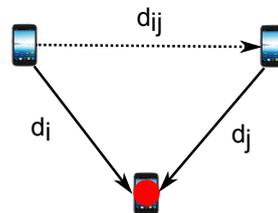


Abbildung 3.35: Dreieck zwischen Empfänger und zwei Sendern

Die Seiten des Dreiecks in Abbildung 3.35 müssen die Dreiecksungleichung erfüllen. Für die fehlerbehafteten Distanzen d_i und d_j lassen sich daraus zwei Bedingungen ableiten

$$d_j \leq d_{ij} + d_i \quad (3.19)$$

$$d_i \leq d_{ij} + d_j. \quad (3.20)$$

Durch diese Bedingung kann eine extrem überschätzte Distanz von einem nahegelegenen Sender mit kürzer geschätzter Distanz widerlegt werden. Ist eine dieser Ungleichungen nicht erfüllt, so passt der Empfänger den zu großen Distanzwert so an, dass die Gleichheit hergestellt wird. Dies ist ein pessimistisches Verhalten, da dies stets einer linearen

Anordnung des Empfängers und der beiden Sender entspricht. Das oben gezeigte Dreieck degeneriert dabei zu parallelen Strecken.

Für die Optimierung werden zunächst alle Sender entsprechend ihrer berechneten Distanz aufsteigend sortiert. Anschließend werden die Sender in einer geschachtelten Schleife paarweise betrachtet und auf die Konsistenz bezüglich der Dreiecksungleichung überprüft.

Zweiter Optimierungsansatz der kooperativen Positionierung

Der zweite Optimierungsansatz basiert auf der Idee, dass bei mehreren Sendern Situationen auftreten können, in denen fehlerhafte Distanzen nicht mit dem ersten Optimierungsansatz eliminiert werden und dadurch das Gesamtergebnis der Positionierung erheblich beeinflussen. Ein solcher Fall ist in der Abbildung 3.36 dargestellt. Die reale Position des Empfängers ist mit einem Punkt markiert.

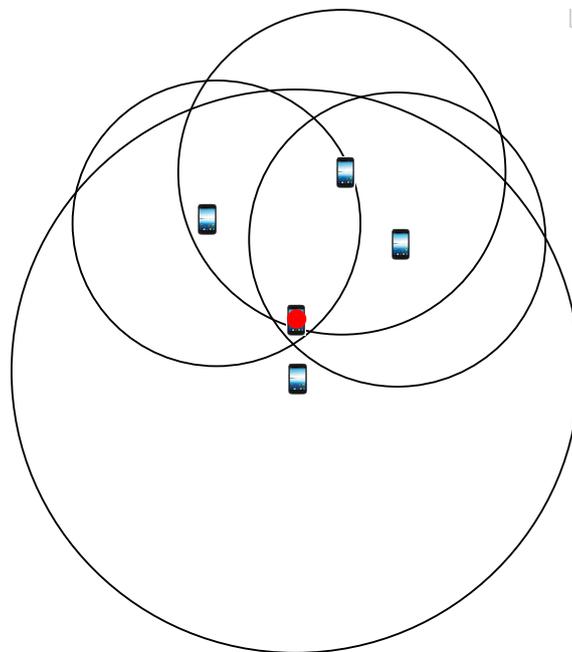


Abbildung 3.36: Beeinflussung der Positionsberechnung durch eine überabgeschätzte Distanz zum Sender. Die Distanzen wurden, ausgenommen vom großen Kreis, nahezu perfekt berechnet bzw. mit dem ersten Ansatz optimiert. Die Positionierung wird jedoch vom großen fehlerhaften Kreis beeinflusst.

Die drei kleinen Kreise schneiden sich jeweils innerhalb des großen Kreises. Bei der Suche nach dem Minimum in einem Szenario ohne Schnittpunkt zwingt jeder Sender die Position zu seiner Kreislinie hin. Ist die Distanz eines Senders deutlich größer als die reale Distanz, dominiert diese Eingabegröße oft das Ergebnis, auch wenn die restlichen Sender exakte Distanzen aufweisen und damit eine Einigung nahe der echten Position finden. Nach den oben

aufgeführten Grundannahmen wird prinzipiell immer mit zu großen Distanzen gerechnet. Dies spiegelt sich jedoch nicht in der zu minimierenden Fehlerfunktion wider. Dort haben eine um d^* zu große Distanz und eine um d^* zu kleine Distanz die gleiche Auswirkung auf den Fehler. In der zweiten Optimierung soll deshalb die Fehlerfunktion $F(x, y)$ so angepasst werden, dass zu kleine Distanzen gegenüber zu großen Distanzen begünstigt werden. Dazu werden zwei Konstanten α und β definiert, mit denen eine Gewichtung der Fehlerquadrate abhängig vom Bereich erfolgt. Die neu gewichteten Fehlerquadrate $r_i^2 = (\tilde{d}_i - d_i)^2$ sehen wie folgt aus

$$r_i^2 = \begin{cases} \alpha * (\tilde{d}_i - d_i)^2, & \text{wenn } \tilde{d}_i < d_i \\ \beta * (\tilde{d}_i - d_i)^2, & \text{wenn } \tilde{d}_i > d_i. \end{cases}$$

α ist der Koeffizient für den Bereich innerhalb der Kreislinie und wird unter den gegebenen Annahmen kleiner als β gewählt. Abbildung 3.37 zeigt den neuen Verlauf der Fehlerfunktion in Abhängigkeit von der Distanz. Die durchgezogene Linie zeigt den ursprünglichen Funktionsverlauf. Die gestrichelte Linie skizziert den für nahe Distanzen flacheren Verlauf der neu gewichteten Fehlerfunktion. Zu beachten ist, dass die Stetigkeit und Differenzierbarkeit der nun abschnittsweise definierten Funktion unverändert bleibt, da die beidseitigen Grenzwerte der Funktionswerte und der Ableitungen an der Grenze der unterschiedenen Fälle zum gleichen Wert konvergieren.

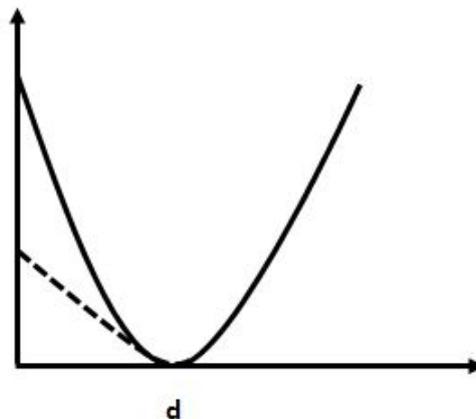


Abbildung 3.37: Normaler Funktionsverlauf und gewichteter Funktionsverlauf. Positionen innerhalb der vorgegebenen Distanz erzeugen einen kleineren Fehler als Positionen außerhalb.

Dritter Optimierungsansatz

Im dritten Optimierungsansatz wird ähnlich zum ersten Ansatz eine geometrische Opti-

mierung höherer Ordnung eingeführt, um inkonsistente Distanzwerte zu erkennen. Im Gegensatz zum einfachen geometrischen Optimierungsansatz werden hier Dreiergruppen von Sendern betrachtet. Bei einer Menge von drei oder mehr Sendern kann es vorkommen, dass eine Untermenge von Sendern zu einer oder mehreren Lösungen tendieren, die durch die verbleibenden Sender widerlegt werden können. Das Verfahren für diese Optimierung sieht vor, dass für jede Dreiergruppe von Sendern der Sender mit der kleinsten Distanz versucht, die Einigung der beiden Sender mit größeren Distanzen zu widerlegen. Dazu werden die Schnittpunkte der größeren beiden Kreise bestimmt. Liegen diese außerhalb des kleinsten Kreises, wird eine Inkonsistenz festgestellt. Abbildung 3.38 zeigt ein häufig aufgetretenes Szenario mit drei Sendern, deren Distanzwerte durch diese Optimierung verbessert werden sollen.

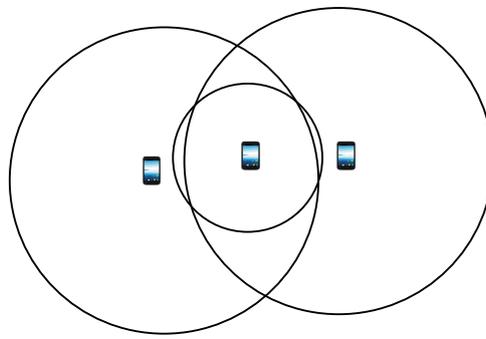


Abbildung 3.38: Spezialfall bei der Aufstellung der Kreise. Die zwei großen Kreise schneiden sich in zwei Punkten die deutlich außerhalb des kleinen Kreises liegen. Der Sender mit der kleinsten Distanz widerlegt die beiden Lösungen, welche die anderen Sender anstreben.

Im Gegensatz zum ersten Optimierungsansatz kann hier jedoch nur die Inkonsistenz in den drei Eingabewerten festgestellt werden. Es ist jedoch nicht offensichtlich, welche Größe mit welchem Fehler behaftet ist. Die festgestellte Inkonsistenz lässt sich jedoch durch heuristische Ansätze kompensieren, die im Folgenden erklärt und in der Evaluierung bewertet werden.

Für die Berechnung der Schnittpunkte zweier Kreise, werden zunächst die zwei Kreisgleichungen aufgestellt

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - d_1^2 = 0 \quad (3.21)$$

und

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 - d_2^2 = 0. \quad (3.22)$$

Durch Gleichsetzen und Umsortieren erhält man

$$2(x_2 - x_1) * x + 2(y_2 - y_1) * y = d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2. \quad (3.23)$$

Dies ist eine Gerade der Form

$$a * x + b * y = c \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} a &= 2(x_2 - x_1) \\ b &= 2(y_2 - y_1) \\ c &= d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2. \end{aligned}$$

Die Gerade geht durch die Schnittpunkte, sofern welche existieren. Durch Einsetzen in eine der Kreisgleichungen erhält man die Schnittpunkte. Um numerische Instabilitäten durch kleine Nenner zu vermeiden, wird je nach Ausrichtung der Gerade die Geradengleichung nach y oder x aufgelöst

$$\begin{aligned} y &= \frac{-a}{b} * x + \frac{c}{b}, & \text{wenn } |b| \geq |a| \\ x &= \frac{-b}{a} * y + \frac{c}{a}, & \text{sonst.} \end{aligned}$$

Im Fall $|b| \geq |a|$ ergibt sich durch Einsetzen in die erste Kreisgleichung eine quadratische Gleichung der Form

$$A * x^2 + B * x + C = 0 \quad (3.25)$$

mit den Ersetzungen

$$\begin{aligned} A &= 1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 \\ B &= -2 * \left(x_1 + \frac{a}{b} * \left(\frac{c}{b} - y_1\right)\right) \\ C &= x_1^2 + \left(\frac{c}{b} - y_1\right)^2 - r_1^2. \end{aligned}$$

Die Lösung erfolgt mit den bekannten Methoden der Schulmathematik. Das Vorzeichen der Diskriminante $B^2 - 4AC$ zeigt an, ob die Gleichung reellwertige Lösungen hat und die Kreise damit Schnittpunkte bilden. Der zweite Fall erfolgt analog durch Einsetzung der zweiten Geradenform in eine der Kreisgleichungen.

Für die Reduzierung der Fehler in den Distanzen werden in dieser Optimierung erneut die Sender entsprechend ihrer Distanzen aufsteigend sortiert. Anschließend werden in geschachtelten Schleifen alle Dreiergruppen gebildet. Aus den zwei größten Kreisen werden die Schnittpunkte berechnet. Liegen diese innerhalb des kleinsten Kreises, wird für diese Dreiergruppe keine Veränderung vorgenommen. Ferner wird die Dreiergruppe auch ignoriert, wenn der kleine Kreis keine Schnittmenge mit den beiden großen Kreisen hat. Dies bedeutet ja, dass die Distanzen bereits zu klein sind. Eine weitere Verringerung der Distan-

zen führt in diesem Fall höchstwahrscheinlich zu einem größeren Fehler. Hat der kleinste Kreis jedoch eine Schnittmenge mit beiden großen Kreisen und liegen die berechneten Schnittpunkte der großen Kreise außerhalb des kleinsten Kreises, so wird eine Inkonsistenz signalisiert. In dieser Arbeit wird durch einen heuristischen Ansatz versucht, den Fehler zu korrigieren. Basierend auf dem Grundsatz, kleineren Distanzen mehr Aussagekraft zu verleihen wird ausgehend vom Mittelpunkt des kleinsten Kreises der minimale Abstand zu den beiden berechneten Schnittpunkten der größeren Kreise gemessen. Dies entspricht der minimalen Distanz zu einer Lösung, welche die beiden anderen Sender gewählt hätten. Die Differenz zwischen diesem Abstand und der Distanz, welche der Sender mit dem kleinsten Kreis selbst vorsieht, wird von den Radien der größeren beiden Kreise abgezogen. Durch die Verringerung der Radien wandern die beiden Schnittpunkte zueinander und damit in die Region des kleinsten Kreises. Abbildung 3.39 zeigt, wie sich die Korrektur auf die Situation auswirkt.

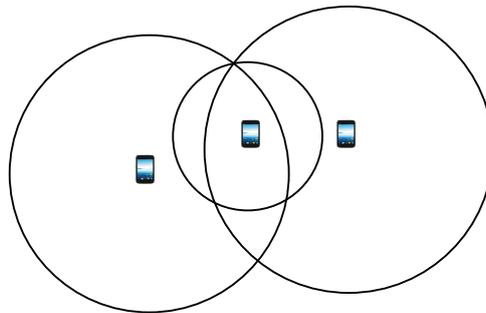


Abbildung 3.39: Angepasste Ausgangssituation für das Gauß-Newton-Verfahren nach der Optimierung. Alle drei Kreise schneiden sich in einem Punkt.

3.3.2.5 Visualisierung

Für die Positionierungsphase wird die bestehende Android-Anwendung erweitert. In der bereits erwähnten Kartenansicht werden alle Positionen und Distanzen ähnlich der gezeigten Schaubilder visualisiert. Neben den optimierten Distanzen können auch die originalen Distanzen angezeigt werden. Die aus der Positionierungsphase gewonnene Position wird als roter Marker hervorgehoben. Über einen Menüpunkt ist es dem Benutzer zu Entwicklungszwecken möglich, den zur aktuellen Position verwendeten Datensatz in eine Evaluierungsdatenbank zu speichern.

Kapitel 4

Evaluierung

Im letzten Kapitel wurde ein System zur kooperativen Positionsbestimmung von Smartphones in Innenräumen entwickelt. Zunächst wurde ein Ansatz zur Messung von Distanzen anhand der Signalstärken von Funkverbindungen zwischen Smartphones untersucht und für die Testumgebung angepasst. Ein einfaches Modell ohne Berücksichtigung der Gebäudeeigenschaften und Sendecharakteristiken kann die zu erwartende Signalstärke beim Empfänger aber nur grob abschätzen. Die Abweichung in der Signalstärke wirkt sich bei Propagierungsmodellen direkt auf die Distanz aus. Deshalb wurden im zweiten Teil des letzten Kapitels kooperative Algorithmen entwickelt, die durch Aggregation und Analyse von Einzeldistanzen die Distanzaussagen verbessern und dadurch eine genauere Positionsbestimmung ermöglichen. Die vorgestellten Optimierungsverfahren sollen in diesem Kapitel evaluiert werden.

4.1 Evaluierungsverfahren

Für die Evaluierung des kooperativen Positionierungssystems werden die vorgestellten Algorithmen implementiert und auf mehreren Smartphones installiert. Die Aufnahme der Evaluationsdaten erfolgt im zweiten Stock des Informatikbaus an der Universität Stuttgart. Dies ist die gleiche Testumgebung, wie sie in der vorangegangenen Studienarbeit gewählt wurde.

Zur Aufnahme von Evaluierungsdaten wird ein Gerät in den Empfängermodus versetzt. Alle anderen Geräte agieren als Sender und werden für einige Aufnahmen fix positioniert, bevor sie in eine neue Konstellation gebracht werden. Das Empfängergerät wird währenddessen in der Hand gehalten und über die Menüführung bedient. Während der Positionierungsphase werden die Koordinaten der Senderpositionen sowie die MAC-Adressen und die

Signalstärke der Wi-Fi Direct Verbindung gesammelt. Diese Daten werden an verschiedenen, über den gesamten Testbereich verteilten Positionen aufgenommen und zur Analyse gespeichert. Zum späteren Vergleich wird über die grafische Oberfläche in der maßstabgetreuen Karte manuell die korrekte Position eingegeben. Diese wird in der Evaluierung zum Vergleich mit der berechneten Position herangezogen. Die manuelle Bestimmung der Aufnahmeposition durch den Benutzer unterliegt unweigerlich einem Fehler. Der Maßstab der zoombaren Karte beträgt 6,2 Zentimeter pro Pixel. Auf einem Touchscreen lässt sich eine Position mit einer Genauigkeit von ca. zehn bis 15 Pixel bestimmen. Die eingegebene Position hat damit eine Genauigkeit von unter einem Metern. Diese Genauigkeit genügt für die meisten standortbezogenen Anwendungen, da die Software die Position nicht genauer angeben muss als der Benutzer sie selbst auf der Karte ablesen kann. Die Evaluierung der Positionierung erfolgt während der Entwicklung der Algorithmen zunächst rein visuell auf dem Smartphone. Für ein tieferes Verständnis werden anschließend die gespeicherten Momentaufnahmen geladen und in die für den Livebetrieb implementierten Algorithmen eingespielt. Dabei schreibt die Anwendung ausführliche statistische Daten auf den Speicher des Smartphones. Anhand der gespeicherten Daten kann sowohl die Distanzberechnung als auch die darauffolgende Positionierung auf ihre Genauigkeit untersucht werden.

In den weiteren Abschnitten dieses Kapitels werden die Distanzberechnung und das Positionierungsverfahren getrennt untersucht. Durch die manuelle Erfassung der Empfängerposition ist es in beiden Fällen möglich, berechnete Werte mit der optimalen Lösung zu vergleichen. Die optimale Lösung entspricht dabei der Position, die der Benutzer im Idealfall zur Anzeige erwarten würde. Ziel des Entwicklungsprozesses war es, die berechnete Position möglichst nahe der erwarteten Position zu bekommen. Ein Fehler im Bereich von wenigen Metern kann dabei toleriert werden, da die angezeigte Position dennoch zur Orientierung in einem großen Gebäude beitragen kann.

Die Distanzberechnung zwischen Empfänger und einem Sender erfolgt in dieser Diplomarbeit mit den Signalstärken mehrerer Wi-Fi Direct Verbindungen, die durch ein Propagierungsmodell in Zusammenhang mit der Distanz gebracht werden (vergleiche Abschnitt 3.3.2.3). Zur Distanzberechnung müssen zuerst die unbestimmten Parameter der Propagierungsfunktion, wie in Abschnitt 3.3.1.2 beschrieben, für die Testumgebung bestimmt werden. Die angepasste Modellfunktion wird dann zur Distanzbestimmung im Positionierungsbetrieb herangezogen. Die Aussagekraft der parametrisierten Modellfunktion für die Testumgebung wird in Abschnitt 4.3.1 untersucht.

Für das Positionierungsverfahren werden zum Vergleich zwei unterschiedliche Metriken betrachtet. Für die Bewertung des Gesamtsystems wird der euklidische Abstand zwischen der realen Position und der berechneten Position des Empfängers herangezogen. Zusätzlich gibt die Betrachtung der Differenz zwischen berechneter und realer Distanz der einzelnen Sender Aufschluss über die Wirkweise der Optimierungsverfahren. Die Untersuchung der

Algorithmen zur Positionsbestimmung erfolgt in Abschnitt 4.3.2.

4.2 Bestimmung der unbekannt Parameter des Propagierungsmodells

Für die Bestimmung der unbekannt Parameter des ausgewählten Propagierungsmodells

$$SS(d) = P_r(d) = P_0 - PL(d) = P_0 - (40,054 + n * \log_{10}(d)) \quad [dB]$$

wird die Datenmenge verwendet, die bereits in Abschnitt 3.3.1.2 bei der Betrachtung der Reproduzierbarkeit von Signalstärken Anwendung fand. Für die Aufnahme der Daten kommen zwei Samsung Galaxy Nexus Smartphones zum Einsatz. Zwischen diesen zwei Geräten wird zunächst eine Wi-Fi Direct Verbindung aufgebaut, wobei eines der Geräte in den Empfängermodus versetzt wird, das andere Gerät übernimmt die Senderrolle. Der Sender befindet sich nacheinander an vier festen Positionen in den einzelnen Korridoren der Testumgebung, während die Position des Empfängers variiert wird. Abbildung 4.1 zeigt die Aufnahmestellen in der Karte des Testgebäudes. Der Empfänger wird in Abständen von einem Meter entlang einer geraden Linie vom Sender entfernt, wobei an jeder Abstandsmarke eine Messreihe von zehn aufeinanderfolgenden Messungen in zeitlichen Abständen von drei Sekunden aufgenommen wird. Die entfernteste Messmarke ist bei 20 Metern. Mit den gespeicherten Daten werden die Parameter der Modellfunktion bestimmt. Dabei wird einmal der Parameter n entsprechend der Freiraumdämpfung bei 20 belassen. Die Minimierung ergibt dann einen Wert für $P_0 = -1,36$. Zum Vergleich wird anschließend sowohl n als auch P_0 optimiert. Der Minimalwert wird hierbei für $P_0 = 26,0$ und $n = 43$ erreicht. Setzt man die ermittelten Parameter in die Modellfunktion ein, erhält man eine Funktion, welche die Signalstärke in Abhängigkeit der Distanz angibt. Diese bijektive Funktion kann zur Berechnung der Distanzen aus den Signalstärken invertiert werden. Abbildung 4.2 zeigt den Verlauf der parametrisierten Modellfunktion für Distanzen bis 20 Meter zusammen mit den einzelnen Messwerten, wobei jedoch ein Punkt der Grafik für mehrere Messproben mit gleicher Signalstärke stehen kann. Dabei wird das mit beiden Parametern optimierte Modell als erweitertes und die Freiraumdämpfung nach Friis als einfaches Modell bezeichnet.

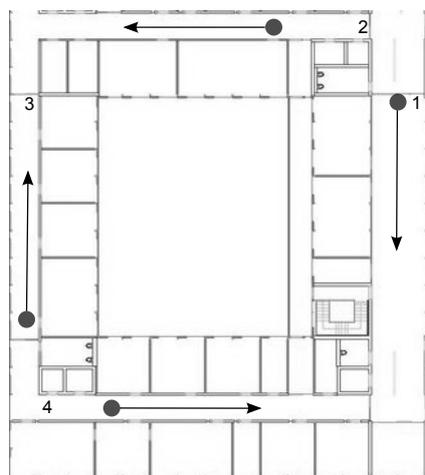


Abbildung 4.1: Aufnahmepositionen der Wi-Fi Direct Signalstärken in der Testumgebung zur Bestimmung der unbekannt Parameter des ausgewählten Propagierungsmodells

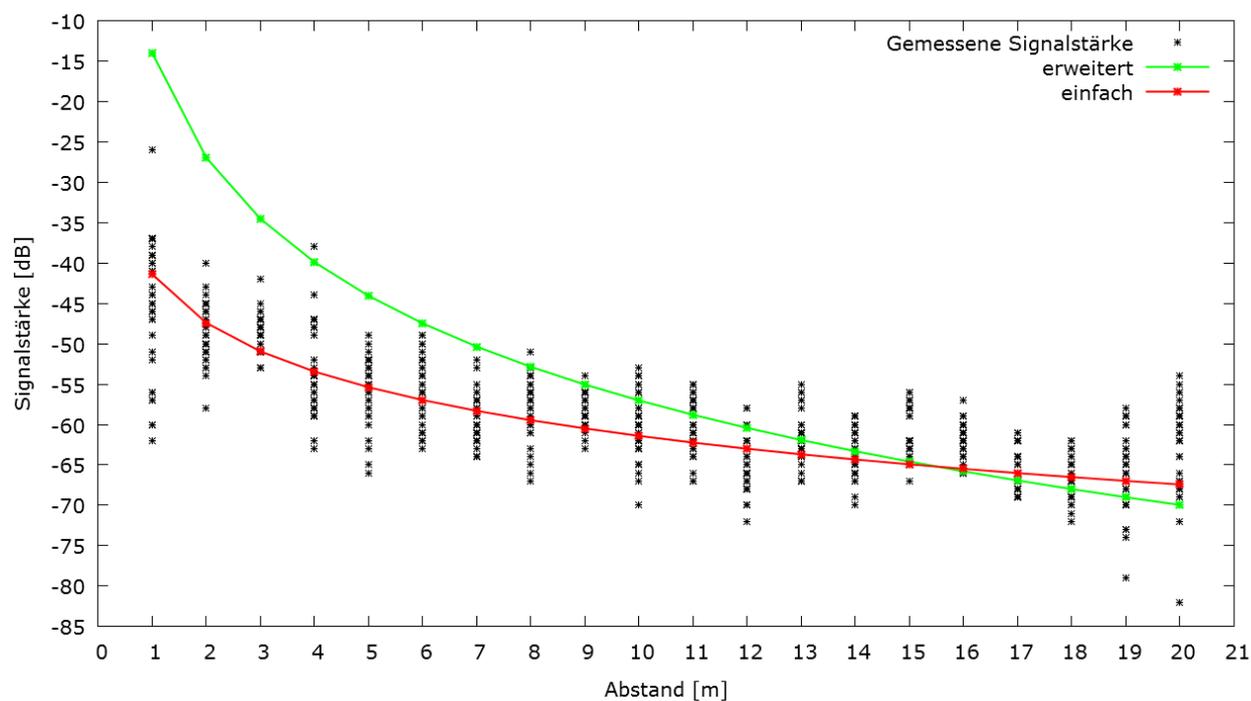


Abbildung 4.2: Berechnete Signalstärken nach dem ausgewählten Propagierungsmodell. Die freien Parameter betragen $P_0 = 26,0$ und $n = 43$ für das erweiterte Modell sowie $P_0 = -1,36$ für das einfache Modell.

Die Abbildung zeigt, dass die resultierenden Verläufe der beiden Parametrisierungen sehr unterschiedlich sind. Die Festsetzung des Parameters n auf 20 bei der einfachen Variante

forciert, dass die Kurve flacher abfällt. Hier wird lediglich die vertikale Verschiebung so optimiert, dass die Kurve inmitten der Punkte liegt. In allen Distanzbereichen liegen die Trainingsdaten sowohl oberhalb als auch unterhalb der Kurve. In der erweiterten Variante werden die vertikale Verschiebung und die Krümmung variiert. Die gewonnenen Parameter geben dem Funktionsgraphen einen steileren Abstieg der Signalstärken. Die Messproben liegen im nahen Distanzbereich bis zehn Meter vorwiegend unter der Kurve, während sie im fernen Distanzbereich ab zehn Meter über der Kurve sind. Damit fallen Distanzen im Nahbereich häufig zu groß aus, während sie im Fernbereich häufig zu klein sind. Abbildung 4.3 zeigt die mittleren Fehler der beiden Modelle bezüglich der realen Distanzen aus der Datenbank. Die Trainingsdaten enthalten nur *Line-of-Sight* Messungen. Im Kapitel 4.3.1

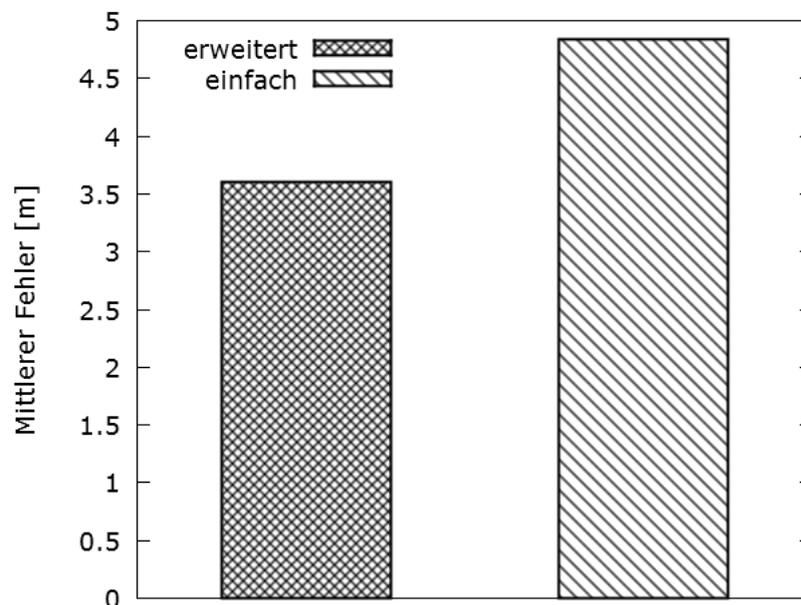


Abbildung 4.3: Mittlerer Fehler des erweiterten und einfachen Propagierungsmodells

werden die Modellfunktionen bezüglich der allgemeinen Messungen im Livebetrieb der Positionierungsphase evaluiert. Für die Trainingsdaten selbst liegt der mittlere absolute Fehler in der Distanzangabe für das erweiterte Modell bei 3,6 Metern, für das einfache Modell ist er 4,8 Meter. Durch den zweiten freien Parameter ist das Ergebnis des erweiterten Modells etwas besser. Allerdings ist der Fehler im einfachen Modell gleichmäßiger über den gesamten Distanzbereich verteilt, so dass Distanzaussagen in allen Weiten ungefähr den gleichen mittleren Fehler aufweisen. Hinsichtlich der Trainingsdaten scheint das erweiterte Propagierungsmodell geeigneter zu sein als das einfache Modell. Für die Distanzbestimmung und die Positionierung im Livebetrieb werden jedoch weiterhin beide Parametersätze gegenübergestellt.

4.3 Ergebnisse

Die Evaluierung der Distanzberechnung und der kooperativen Positionierung basiert auf einer Datenmenge mit insgesamt 34 unterschiedlichen Aufnahmepositionen, in denen alle vier Testgeräte simultan in Verwendung sind. Eines der Testgeräte wird als Empfänger benutzt, um mit Hilfe der drei anderen Sender seine Position im Testgebäude zu bestimmen. Die 34 Aufnahmepositionen sind über die vier Flure der Testumgebung verteilt und wurden zufällig ausgewählt. Für jede Aufnahme werden die Sender an unterschiedlichste Positionen gebracht und dabei die Abstände zum Empfänger variiert. Die Sender liegen während der Aufnahme fix an einer Stelle. Der Empfänger wird in der Hand geführt. Jede Aufnahme umfasst die realen Gebäudekoordinaten des Empfängers und der Sender sowie die MAC-Adresse und die gemessenen Signalstärken aller Wi-Fi Direct Verbindungen zwischen dem Empfänger und den Sendern. Die Ermittlung der realen Koordinaten erfolgt manuell über die grafische Bedienoberfläche. Pro Aufnahmeposition werden in Abständen von drei Sekunden insgesamt vier Datensätze gespeichert. Die folgenden zwei Abschnitte bereiten die aufgenommenen Daten auf und bewerten sie. Der erste Abschnitt widmet sich der unoptimierten Distanzbestimmung aus Signalstärken. Der zweite Abschnitt untersucht die kooperative Positionierung.

4.3.1 Distanzberechnung

Für die Evaluierung der Distanzberechnung im Livebetrieb der Positionierungsanwendung wurden die Modellparameter der Anwendung zunächst mit den oben erwähnten Trainingsdaten optimiert, so dass sich erneut die Werte $P_0 = -1,36$ für das einfache Modell bzw. $P_0 = 26,0$ und $n = 43$ für das erweiterte Modell ergeben. Mit der nun an die Testumgebung angepassten Modellfunktion werden die neu aufgenommenen Punkte getestet. Dazu wird die Distanz mit der Modellfunktion berechnet und mit der vom Benutzer festgelegten Distanz verglichen. Die einfache Modellfunktion weist dabei einen mittleren absoluten Fehler

	erweitertes Modell	einfaches Modell
Mittlerer Fehler	5,6 Meter	3,6 Meter
Maximaler Fehler	16,4 Meter	28,7 Meter

Abbildung 4.4: Mittlerer und maximaler Fehler der Distanzberechnung

von 3,6 Metern auf - bei der erweiterten Modellfunktion liegt der Fehler mit 5,6 Metern

deutlich höher. Durch den flacheren Verlauf der Kurve sorgen Ausreißer mit niedrigerer Signalstärke beim einfachen Modell jedoch für einen maximalen Fehler von 28,7 Metern. Der maximale Fehler bei der erweiterten Minimierung ist hier mit 16,4 Metern deutlich besser.

Betrachtet man die Verteilung der Distanzfehler, sieht man die allgemein aussagekräftigere Distanzmessung durch das einfache Propagierungsmodell. Abbildung 4.5 zeigt, wie viel Prozent der Messungen innerhalb verschiedener Fehlerobergrenzen liegen. Beide Modelle

	erweitertes Modell	einfaches Modell
< 5 Meter	46%	77%
< 7 Meter	82%	85%
< 10 Meter	91%	91%
< 15 Meter	99%	97%
< 20 Meter	100%	99%

Abbildung 4.5: Prozentuale Fehlerobergrenzen der Distanzberechnung

weisen in 90 Prozent der Fälle einen Distanzfehler unter zehn Metern auf; das einfache Propagierungsmodell in 77 Prozent der Fälle sogar einen Distanzfehler kleiner als fünf Meter.

Entgegen den Beobachtungen bei den Trainingsdaten, erweist sich das einfachere Modell als praxistauglicher gegenüber dem erweiterten Modell. Für einen umfassenderen Vergleich müssten allerdings mehr verschiedene Geräte miteinander verglichen werden. Die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen sind jedoch prinzipiell unabhängig von der konkreten Ausprägung des Modells, sofern die tatsächlich gemessenen Signalstärken vorwiegend unterhalb des theoretisch erreichbaren Wertes liegen und Distanzen damit überabgeschätzt werden. Für diese Arbeit erweist sich die einfache Modellfunktion als die bessere Wahl. Der mittlere Fehler ist kleiner und gleichmäßig über den gesamten Distanzbereich.

Für eine Innenraumnavigation ist eine Positionierung mit ca. fünf Meter Genauigkeit in den meisten Fällen bereits ausreichend. Dies entspricht ungefähr der Länge eines mittelgroßen Raumes. In einem sehr großen Gebäudekomplex lässt sich somit die Position in der Genauigkeit von einzelnen Räumen angeben, was sich meist als ausreichende Hilfe erweist. Ob die Positionierung durch die entwickelten Algorithmen verfeinert werden kann, wird im nächsten Kapitel untersucht.

4.3.2 Kooperative Positionierung

Wie der vorige Abschnitt zeigt, können Wi-Fi Direct Signalstärken trotz Diskrepanz zwischen theoretisch zu erwartender und tatsächlich gemessener Empfangsleistung als Indikator für den Abstand zwischen zwei verbundenen Geräten Anwendung finden. Durch kooperative Algorithmen kann die geometrische Anordnung und die redundante Positionsinformation der beteiligten Geräte genutzt werden, um die Distanzaussagen der einzelnen Geräte weiter zu präzisieren. In dieser Diplomarbeit wurden einige solcher Optimierungen entwickelt und implementiert. Auf Basis der optimierten geometrischen Aussagen der Sendergeräte kann schließlich eine Position bestimmt werden, die bestmöglich zu den gesammelten Aussagen passt. Die Methode der kleinsten Quadrate bietet eine gute Möglichkeit, eine Position hinsichtlich mathematisch formulierter Bedingungen zu optimieren (vergleiche Abschnitt 3.3.2.4).

Die Suche nach geeigneten Punkten mit der Methode der kleinsten Quadrate ergibt für diese Problemstellung ein nichtlineares Ausgleichsproblem. Das Lösen dieses Gleichungssystems erfolgt in dieser Diplomarbeit mit dem Gauß-Newton-Verfahren. Dieses Verfahren nähert sich ausgehend von einem gegebenen Startwert iterativ an eine bessere Lösung an. Als Startpunkt werden die beiden Schnittpunkte der Kreise gewählt, die den Sendern mit den geringsten Distanzen entsprechen. Den Sendern mit den höchsten Signalwerten wird eine höhere Aussagekraft zugeordnet, somit entspricht die Wahl dieser Startpunkte einer Schätzung der Position unter exklusiver Betrachtung der besten beiden Sender. Für die iterative Anpassung werden alle Sender berücksichtigt. Anhand des finalen Residuums der beiden Lösungen wird entschieden, welche Position an die Anwendung zurückgegeben wird.

Dieser Abschnitt umfasst die Evaluierung des kooperativen Positionierungssystems und gliedert sich in zwei Unterabschnitte. Im ersten Teil erfolgt eine Gegenüberstellung der Positionierungsfehler für die Anwendung des Positionierungsverfahrens mit und ohne den Optimierungsansätzen aus Abschnitt 3.3.2.4. Im nicht optimierten Fall wird aus den vier aufgenommenen Signalstärken jeder Aufnahmeposition der Mittelwert gebildet und zur Berechnung der Distanz genutzt. Mit den berechneten Distanzen und den Koordinaten der Sender wird mit Hilfe der Gauß-Newton-Methode die Position des Empfängers abgeschätzt. Erneut wird die reale Position, die über die Benutzerfläche eingegeben wird, zum Vergleich als optimale Lösung herangezogen. Dieselbe Vorgehensweise wird anschließend mit den hinzugefügten Optimierungsansätzen wiederholt. Im zweiten Teil erfolgt die ausführliche Analyse zweier Beispielszenarien hinsichtlich verschiedener relevanter Größen.

4.3.2.1 Ergebnisse des nicht optimierten und optimierten Positionierungsverfahrens

Der Fehler für das Positionierungsverfahren ohne die in dieser Diplomarbeit entwickelten Optimierungen wird in den Abbildungen 4.7 und 4.6 dargestellt. In beiden Schaubildern wird erneut zwischen den beiden Parametersätzen des Propagierungsmodells zur Distanzbestimmung unterschieden. Die mittlere Distanz zwischen dem berechneten Punkt und der tatsächlichen Position des Empfängers beträgt für das erweiterte Modell 9,3 Meter und für das einfache Modell 5,3 Meter. Die Positionsbestimmung ohne Optimierung hat damit einen gering größeren mittleren Fehler als die reine Distanzbestimmung zu einem einzelnen Gerät. Die maximale Abweichung der Position beträgt für das erweiterte Modell 21,2 Meter und für das einfache Modell 24,0 Meter. Die Ursache für den großen Maximalfehler liegt vor allem darin, dass ein einzelner schlechter Distanzwert ohne die Optimierungen das Gesamtergebnis massiv beeinflussen kann. Bei beiden Modellen handelt es sich jedoch nur um genau einen Fall. Der zweitgrößte Fehler in der Positionierung beträgt 10,1 Meter für das einfache Modell bzw. 16,1 für das erweiterte Modell.

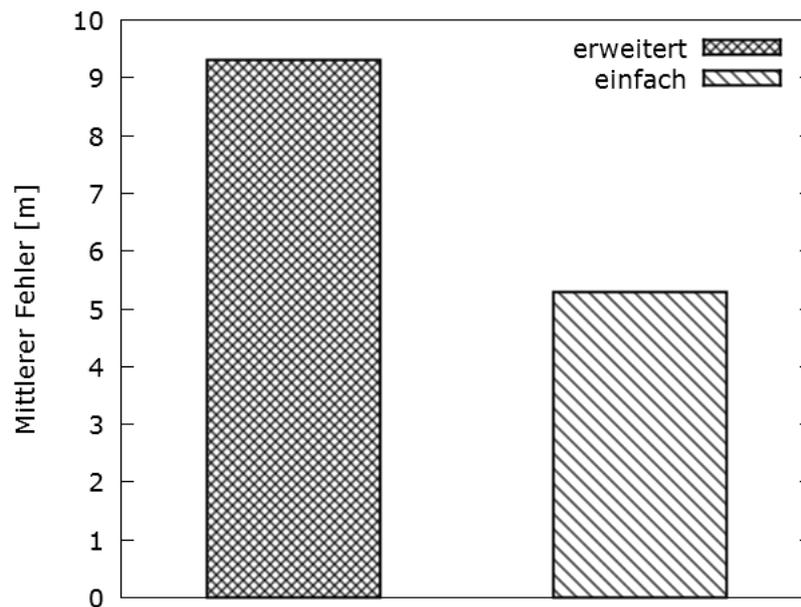


Abbildung 4.6: Mittlerer Fehler bei dem nicht optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung

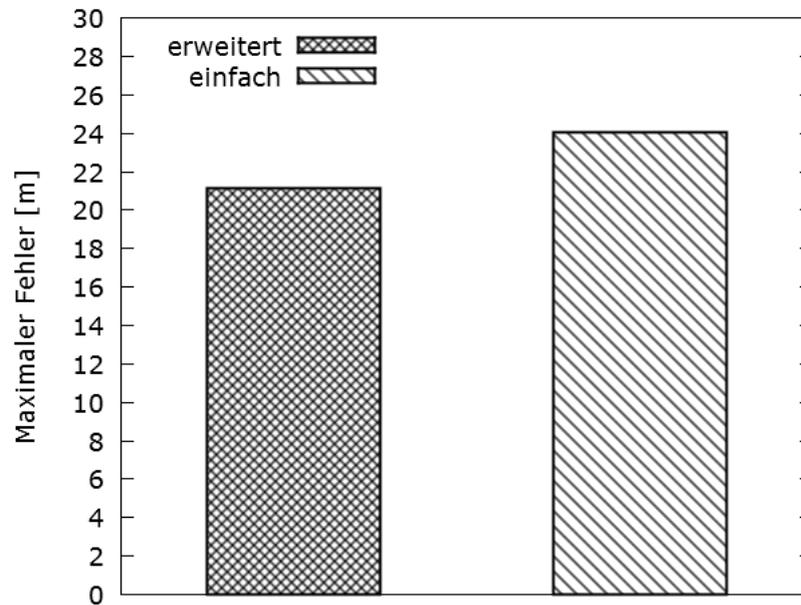


Abbildung 4.7: Maximaler Fehler bei dem nicht optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung

Die Einzeldistanzen haben im unoptimierten Fall einen mittleren Fehler von 2,9 Meter für das einfache Modell und 4,9 Meter für das erweiterte Modell. Beide mittleren Fehler werden durch die Optimierungen um ca. einen Meter verbessert.

Der mittlere und maximale Fehler für das mit den drei Optimierungsansätzen erweiterte Positionierungssystem ist in den Abbildungen 4.9 und 4.8 dargestellt. Als Startpunkt für das Gauß-Newton-Verfahren dienen erneut die Lösungen der zwei Sender, mit den höchsten Signalwerten. Bei der Verwendung des einfachen Modells zur Distanzberechnung beträgt der mittlere Fehler in der Positionierung 3,7 Meter. Mit dem erweiterten Modell liegt der Fehler bei 7,2 Meter. Die Optimierungen reduzieren den Fehler in beiden Fällen um 1,5 bis zwei Meter. Ferner lässt sich durch Sichtung der Einzeldiagramme feststellen, dass die zu minimierenden Fehlerfunktionen nach den Optimierungen besser konditioniert sind. Wählt man als Abbruchkriterium, dass sich die Position um weniger als zehn Zentimeter verändert, so konvergiert das Gauß-Newton-Verfahren auf den optimierten Eingabewerten meist in unter fünf Iterationen zur Lösung. Die maximalen Fehler werden durch die Optimierungen ebenfalls verringert und betragen im erweiterten Modell 14,4 Meter und im einfachen Modell 10,9 Meter.

Abbildung 4.10 zeigt, für wie viel Prozent der ausgewerteten Szenarien eine Position innerhalb verschiedener Maximalfehler ermittelt werden kann. Mit dem einfachen Propagierungsmodell ist in über der Hälfte der Fälle eine Positionierung mit einem Abstand kleiner

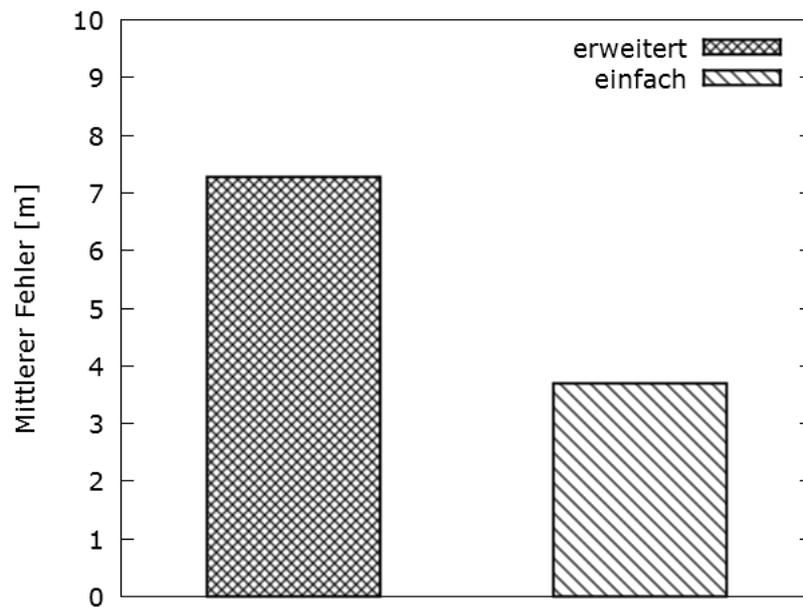


Abbildung 4.8: Mittlerer Fehler bei dem optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung

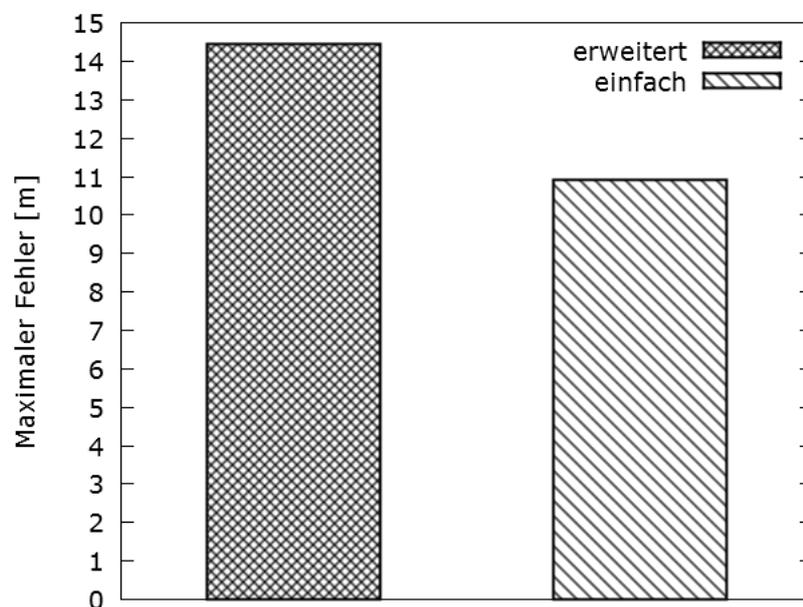


Abbildung 4.9: Maximaler Fehler bei dem optimierten Positionierungsverfahren mit der einfachen und erweiterten Distanzberechnung

als drei Meter möglich. In 80 Prozent der Fälle beträgt die Differenz fünf Meter oder we-

niger. 97 Prozent weisen einen Fehler unter zehn Metern auf. Mit dem erweiterten Modell sind die Werte etwas schlechter. Fehler unter drei Meter sind hier die Ausnahme. Unter fünf Meter Abweichung wird nur in 18 Prozent der Fälle erreicht. 83 Prozent der ausgewerteten Szenarien zeigten eine Position im Bereich von zehn Metern um die tatsächliche Position.

	erweitertes Modell	einfaches Modell
< 1 Meter	0%	13%
< 2 Meter	0%	28%
< 3 Meter	3%	53%
< 4 Meter	9%	65%
< 5 Meter	18%	78%
< 6 Meter	32%	78%
< 7 Meter	62%	90%
< 8 Meter	65%	90%
< 9 Meter	76%	94%
< 10 Meter	82%	97%

Abbildung 4.10: Prozentuale Fehlerobergrenzen der Positionierung

Mit den entwickelten Optimierungen und dem einfachen Modell lässt sich somit bereits das Benutzererlebnis steigern. Die Positionierung ist in allen Szenarien erfolgreich und berechnet eine Position, die durchschnittlich 3,7 Meter von der tatsächlichen Position entfernt ist. Die Größenordnung ist vergleichbar mit der GPS-Positionierung in Außenbereichen. Die kooperativen Optimierungen nutzen redundante Information, um die Position zu verbessern. Die hier ausgewerteten Szenarien weisen mit drei Sendern die Minimalanzahl an Sendern auf, weshalb im nächsten Abschnitt noch zwei komplexere Szenarien mit mehr Sendern untersucht werden sollen.

4.3.2.2 Detaillierte Analyse zweier Szenarien

In diesem Abschnitt sollen zwei unterschiedliche Aufnahmeszenarien detailliert untersucht werden. Bei beiden Szenarien besteht die Möglichkeit, mehr als drei Sender für die Positionierung zu kombinieren. Im ersten Szenario können insgesamt sieben Sender, im zweiten Szenario sechs Sender für die Positionsberechnung ausgewertet werden. Ziel dieses Abschnitts ist die Untersuchung der Algorithmen unter Variation verschiedener Aspekte. Da zur Evaluierung die erforderliche Anzahl an Geräten nicht zur Verfügung steht, werden die sieben bzw. sechs Sender nicht simultan aufgenommen. Stattdessen wird mit einem Sender von mehreren Positionen die benötigte Information übertragen. Die im Empfänger aufgesammelten Daten werden interpretiert, als ob sie gleichzeitig gemessen werden

konnten. Effekte der gegenseitigen Beeinflussung im Simultanbetrieb werden dadurch in diesen Aufnahmen nicht berücksichtigt. Da die Sender aber auch im Simultanbetrieb in kurzen Intervallen ihre Daten senden und vielfache Daten im Empfänger aggregiert werden, besteht die gegenseitige Beeinflussung der Geräte auch im gleichzeitigen Betrieb nicht grundsätzlich. Der Empfänger bleibt für jedes Szenario an einem Platz liegen.

Die beiden Szenarien sollen auf Genauigkeiten bei der Distanzberechnung und Positionierung mit unterschiedlichen Optimierungen und Startpositionen für das Gauß-Newton-Verfahren untersucht werden. Die Berechnung der Distanz erfolgt mit dem erweiterten Modell, das ohne Optimierungen zunächst große Fehler in den Einzeldistanzen aufweist. Für die Genauigkeit der Distanzberechnung und Positionierung werden folgende Varianten des Verfahrens betrachtet:

- A) Unoptimiertes Positionierungsverfahren mit dem Mittelwert als Aggregation mehrerer Messwerte für einen Sender
- B) Unoptimiertes Positionierungsverfahren mit dem Maximum als Aggregation mehrerer Messwerte für einen Sender
- C) Positionierungsverfahren mit dem ersten Optimierungsansatz
- D) Positionierungsverfahren mit dem ersten und zweiten Optimierungsansatz
- E) Positionierungsverfahren mit dem ersten, zweiten und dritten Optimierungsansatz

Die Maximierung als Aggregationsfunktion aus B) wird auch für die Varianten C) bis E) genutzt. Für die Wahl des Startpunkts werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die erste Wahl fällt erneut auf einen der Schnittpunkte, die aus den Kreisen der beiden Sender mit den geringsten Distanzen entstehen, wobei der Schnittpunkt mit dem besseren Residuum gewinnt. Dies entspricht hier dem Fall, dass noch keine Position bekannt ist (Anfangsphase der Positionierung). Dieser Startpunkt wird im Folgenden mit SK abgekürzt. Die zweite Variante fängt an der realen Position an und zeigt, wie die Positionsbestimmung erfolgt, wenn schon eine Position nahe der echten bekannt ist. Dieser Startpunkt wird mit RP abgekürzt. Die fünf Varianten A) bis E) werden jeweils mit beiden Startpunkten ausgewertet.

Die Abbildungen 4.11 und 4.12 zeigen den maximalen und mittleren Fehler der Distanzberechnung im ersten bzw. zweiten Szenario. Im ersten Szenario ist der mittlere Fehler in den Einzeldistanzen 6,4 Meter. Durch die Wahl der größten Signalstärke in einem Punkt verbessert sich der Fehler auf 5,1 Meter. Die beiden geometrischen Optimierungen C) und E) senken den Fehler weiter auf 2,9 Meter. Der maximale Fehler kann von 12,0 Meter auf 7,6 Meter reduziert werden. Zu beachten ist, dass die Optimierung D) keinen Einfluss auf

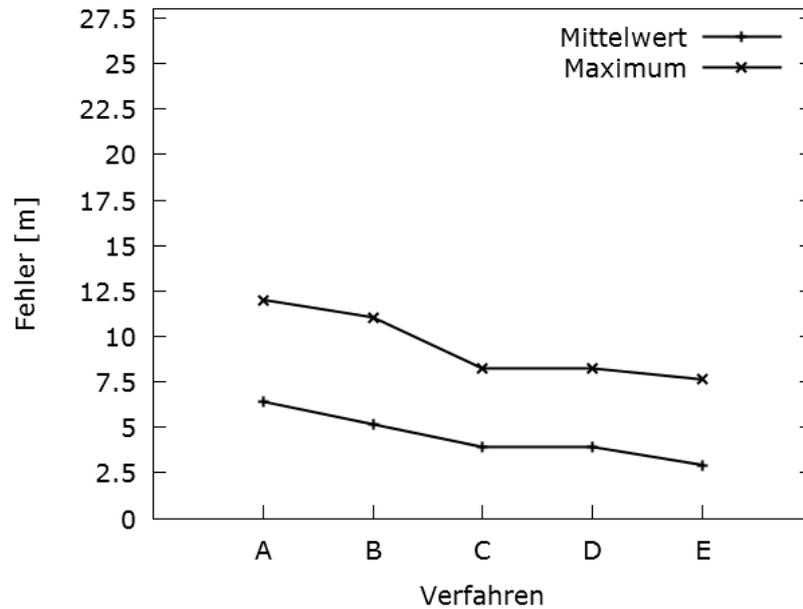


Abbildung 4.11: Fehler der Distanzberechnung - erstes Szenario

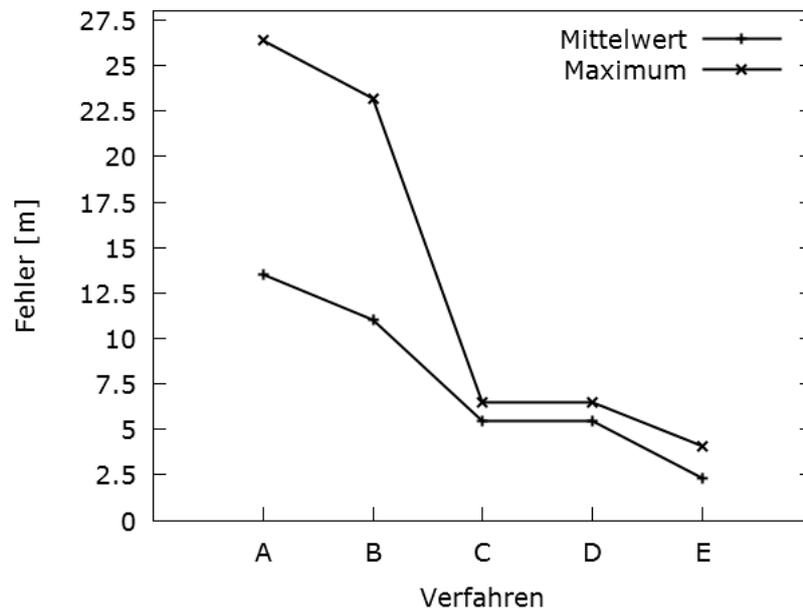


Abbildung 4.12: Fehler der Distanzberechnung - zweites Szenario

die Einzeldistanzen hat. Diese verändert lediglich die Gesamtfehlerfunktion, die durch das Gauß-Newton-Verfahren minimiert wird.

Im zweiten Szenario beträgt der mittlere Fehler zunächst 13,5 Meter. Durch die geometri-

schen Optimierungen C) und E) kann der mittlere Fehler in der Distanz zunächst auf 5,5 Meter und zuletzt auf 2,3 Meter gesenkt werden. Der maximale Fehler fällt von 26,3 Meter auf 4,1 Meter ab. Die Kooperation hilft hier also deutlich, den Ausreißer zu erkennen und dessen Einfluss auf die spätere Berechnung der Position zu reduzieren. In beiden Szenarien führt die erste Optimierung zu einem mittleren Fehler von ca. fünf Metern. Es ist also zu erwarten, dass die Gesamtaussage der sechs Sender deutlich verbessert werden kann.

Nun soll untersucht werden, wie sich die Verbesserung der Einzeldistanzen auf die Positionierung auswirkt. Dazu werden die fünf Variationen des Verfahrens mit den zwei verschiedenen Startpunkten SK und RP ausgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.13 und Abbildung 4.14 zu finden. Auch hier ist zu beobachten, dass sich die Positionierung

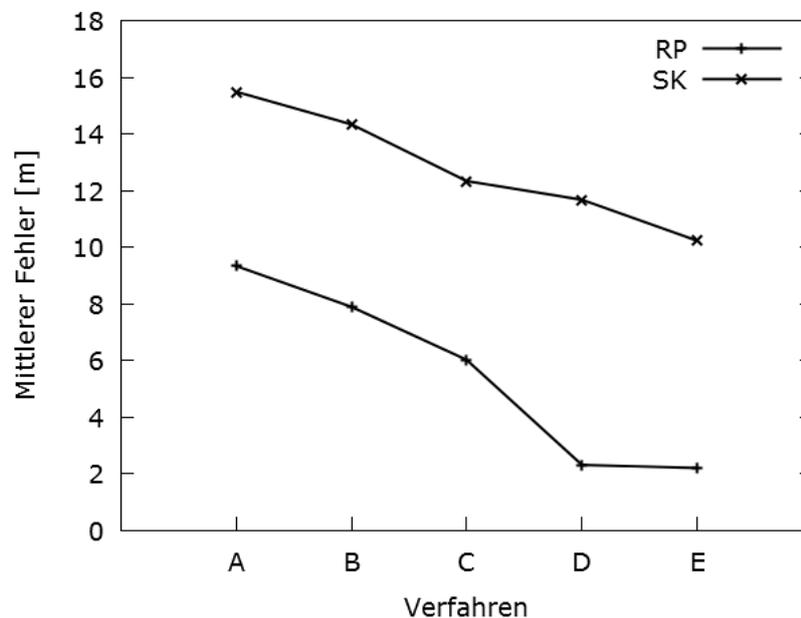


Abbildung 4.13: Fehler der Positionierung - erstes Szenario mit der realen Position und dem Schnittpunkt der zwei kleinsten Kreise als Startpunkt für das Gauß-Newton-Verfahren

mit der Hinzunahme der Optimierungen stets verbessert. Das erste Verfahren im ersten Szenario generiert einen Fehler von 9,3 Meter für den Startpunkt RP und 15,5 Meter für den Startpunkt SK. Im zweiten Szenario beträgt der Fehler für beide Startpunkte 16,6 Meter. Das heißt, dass selbst die Kenntnis über die reale Position nicht hilft, eine gute Position durch den Algorithmus zu erhalten, da die reale Position nicht zu den Aussagen der einzelnen Sender passt. Die fehlerbehafteten Distanzangaben der Sender verschieben das Minimum der Gesamtfehlerfunktion. Je mehr Sender es sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Einzelaussagen sich widersprechen.

Zusammen mit den Optimierungen kann der Fehler je nach Startpunkt bis auf 2,1 Me-

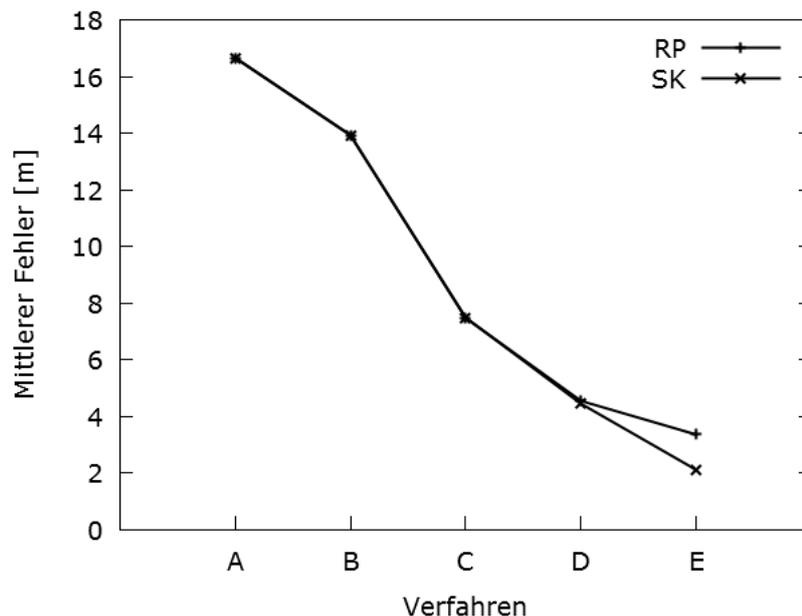


Abbildung 4.14: Fehler der Positionierung - zweites Szenario mit der realen Position und dem Schnittpunkt der zwei kleinsten Kreise als Startpunkte für das Gauß-Newton-Verfahren

ter reduziert werden. Für die Positionierung ohne Vorkenntnis einer Position im ersten Szenario bleibt der Fehler mit 10,2 Meter relativ groß. Die Ursache liegt hier darin, dass einige der Sender entlang eines Korridors positioniert sind. Die Betrachtung der Isolinien der Gesamtfehlerfunktion zeigen, dass die Einzelfehler zwar größtenteils korrigiert werden konnten, dadurch jedoch ein zweiter Schnittpunkt aus mehreren Kreisen und damit ein zweites lokales Minimum in der Gesamtfehlerfunktion entsteht. Hier hängt die Positionierung stark von der Startposition ab. Bei frisch eingeschalteter Positionierung würde hier der Fehler zunächst groß sein. Im Falle einer vorangegangenen, erfolgreichen Positionierung (Startpunkt RP) beträgt der Fehler ebenfalls 2,1 Meter. Im zweiten Szenario tritt dieses Problem nicht auf. Hier sind die Sender besser über das Gebäude verteilt.

Zuletzt soll noch der Einfluss der Senderanzahl auf das Positionierungsergebnis untersucht werden. Dazu werden erneut die beiden Szenarien mit sieben bzw. sechs Sendern herangezogen. Aus der vollständigen Menge der Sender werden alle Teilmengen der Größe drei oder mehr gebildet und in dem Positionierungsverfahren mit allen Optimierungen ausgewertet. Dadurch lässt sich bewerten, ob die gleiche Position auch mit weniger Sendern gefunden werden kann. Abbildungen 4.15 und 4.16 veranschaulichen die mittleren Fehler beider Szenarien über die Anzahl der Sender für die beiden Startpunkte SK und RP. Aus den Abbildungen ist zu sehen, dass sich der mittlere Fehler bei der Positionierung mit steigender Anzahl an Sendern meist verbessert. Lediglich die Positionierung mit allen

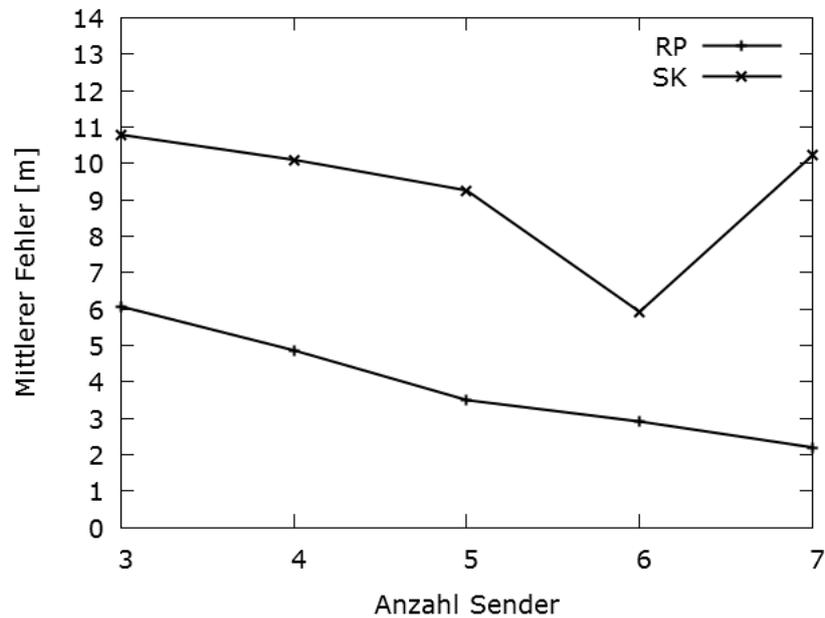


Abbildung 4.15: Mittlerer Fehler bei der Positionierung mit variierender Anzahl der Sender - erstes Szenario

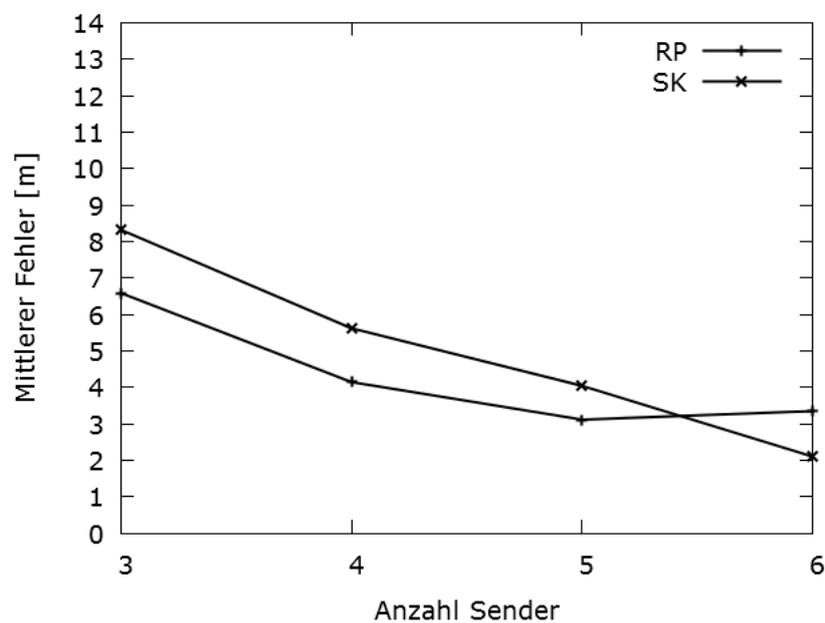


Abbildung 4.16: Mittlerer Fehler bei der Positionierung mit variierender Anzahl der Sender - zweites Szenario

Sendern schlägt im ersten Szenario fehl. Die Gründe dafür wurden oben genannt. Dazu sei erwähnt, dass es für eine siebenelementige Menge von Sendern auch nur eine sieben-

elementige Teilmenge existiert. Dem letzten Punkt der Kurve kann also nicht die gleiche Bedeutung gegeben werden, wie den vorigen, die aus mehreren Konstellationen gemittelt werden. Die mittleren Fehler der Einzeldistanzen nehmen dabei ebenfalls mit steigender Anzahl von Sendern ab.

In der gegebenen Testumgebung profitiert ein Empfänger also von der größeren Anzahl an Sendern. Mehr Geräte lassen sich in dieser Testumgebung nicht sinnvoll platzieren, ohne dass die erste Optimierung die Aussagen der zusätzlichen Sender auf die jeweils nächsten Nachbarn anpassen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen noch ein Beispiel der Positionierung aus dem ersten Szenario mit drei Sendern und der realen Position RP als Startpunkt für das Gauß-Newton-Verfahren. Die fünf Bilder zeigen jeweils die gleiche Ausgangskonstellation mit den verschiedenen Optimierungen A) bis E).

Die türkisblauen Punkte und Kreise in den Abbildungen sind die Positionen der Sender und die tatsächlichen Distanzen, die sich somit immer in der realen Position schneiden, welche wiederum als roter Punkt dargestellt wird. Die lila Kreise sind die mit Verfahren B) berechneten unoptimierten Einzeldistanzen der Sender - die schwarzen Kreise zeigen die optimierten Distanzen. Die grauen Linien stellen Isolinien dar und dienen zur Veranschaulichung des Verlaufs der Gesamtfehlerfunktion. Oben rechts steht der Positionierungsfehler und die Anzahl der Iterationen bis das Verfahren konvergiert.

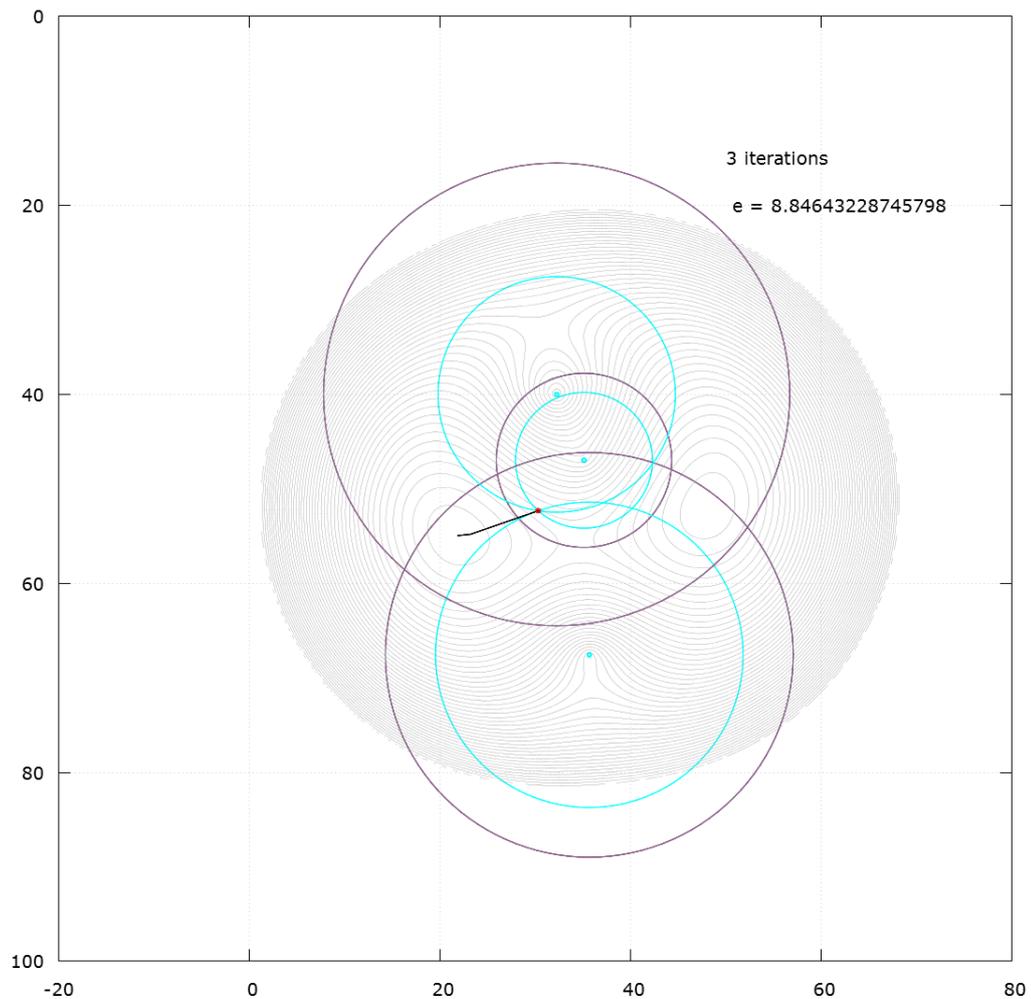


Abbildung 4.17: Positionierung mit Verfahren A. Zwei der Sender haben durch zu kleine Signalstärken die Distanz deutlich zu groß geschätzt. Es gibt keinen Punkt, der zu allen drei Kreisen passt. Die beiden Sender mit großen Distanzwerten schieben das Minimum der Gesamtfehlerfunktion nach außen.

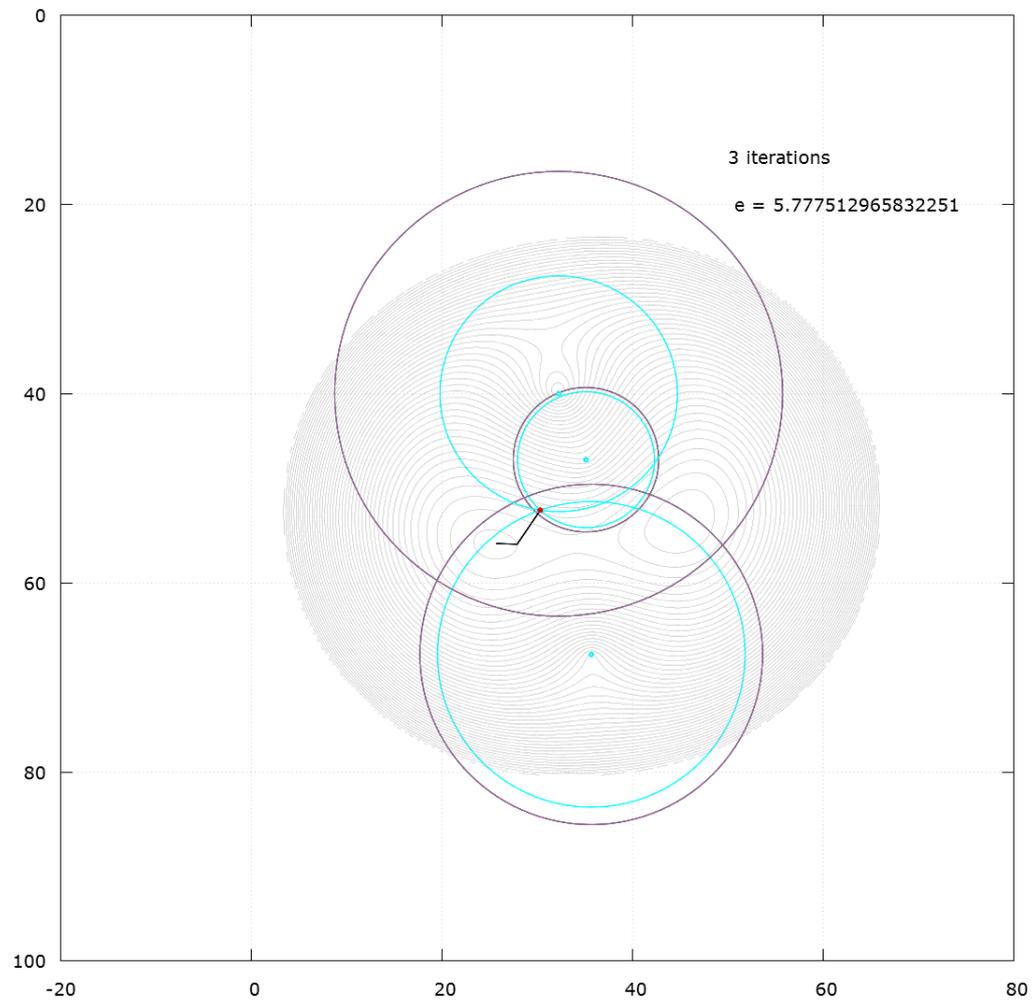


Abbildung 4.18: Positionierung mit Verfahren B. Durch Maximumbildung mehrerer Signalwerte kann der untere Sender seine ermittelte Distanz selbst korrigieren.

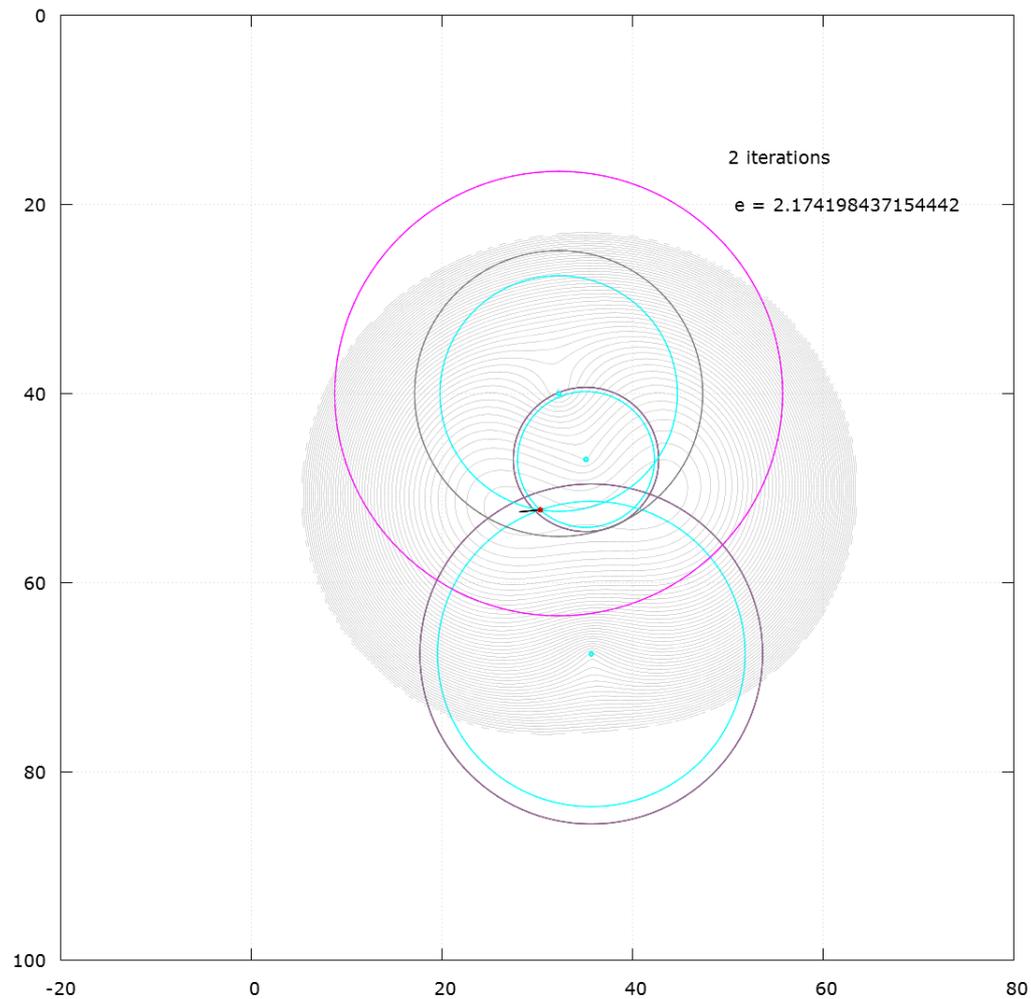


Abbildung 4.19: Positionierung mit Verfahren C. Die geometrische Beziehung zwischen den oberen beiden Sendern passt nicht zu den ermittelten Distanzen. Die geforderte Distanz des oberen Senders verletzt die Dreiecksungleichung des Dreiecks aus den beiden Sendern und dem Empfänger. Dem mittleren Sender wird mehr Gewicht verliehen, da hohe Signalwerte auch theoretisch nur in der Nähe von Sendern gemessen werden können. Die Aussage des oberen Senders wird korrigiert. Es gibt aber nach wie vor keinen Punkt, der auf allen drei Kreisen liegt. Der Lösungspunkt ist ein Kompromiss aus den drei Aussagen.

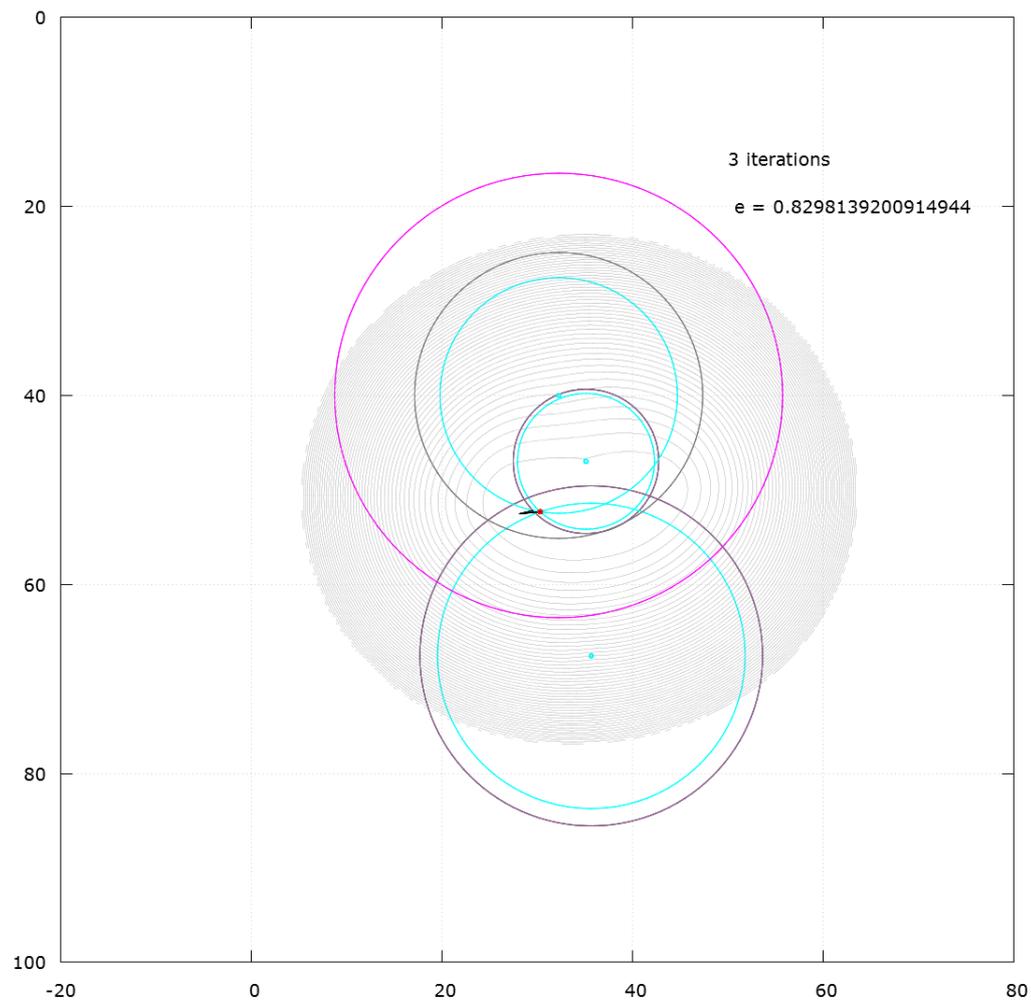


Abbildung 4.20: Positionierung mit Verfahren D. Aufgrund der Annahme, dass Distanzen eher überabgeschätzt werden, wird der Fehler einer Position innerhalb des Kreises geringer gewichtet als der Fehler außerhalb des Kreises. Dadurch kann der Kompromiss aus drei widersprüchlichen Aussagen innerhalb der abgeschätzten Distanzen freier bewegt werden. Dem mittleren Sender mit der kürzesten Distanz wird dadurch mehr Gewicht verliehen.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

In der heutigen mobilisierten Welt spielen Navigationslösungen eine entscheidende Rolle. Die Positionierung in Innenbereichen ist ein sehr komplexes Thema. Bis heute existieren keine einheitlichen Standards für eine Innenraumpositionierung. Im Gegensatz dazu bietet das GPS in Außenbereichen eine Möglichkeit seine Position mit akzeptablen Genauigkeiten zu bestimmen. Die meisten bestehenden Innenraumpositionierungssysteme basieren auf Funkverbindungen und ihren Eigenschaften. Smartphones eignen sich durch die hohe Anzahl an integrierten Sensoren und ihre Rolle als ständiger Begleiter des Menschen besonders gut zur Positionierung.

Die kooperative Positionierung von Smartphones ist ein aktuelles Forschungsthema im Bereich funkbasierter Ortungsverfahren. Die Kooperation mit anderen Geräten bietet eine gute Möglichkeit sowohl zur initialen Positionierung als auch zur Verbesserung bereits eingesetzter Positionierungsmethoden. Eine kooperative Positionierung ist unabhängig vom Einsatzort und sowohl in Außenbereichen als auch in Innenbereichen möglich. Die Kooperation erweist sich dann als sinnvoll, wenn beispielsweise ein Smartphone nicht in der Lage ist, auf die Netzwerkinfrastruktur zuzugreifen oder aber auch dann, wenn die Nutzung bestehender Verfahren ungeeignet ist. Die kooperative Positionierung bietet eine robuste Methode zur Lokalisierung, die unabhängig von einer Infrastruktur arbeiten kann.

In dieser Diplomarbeit wurde ein kooperatives Innenraumpositionierungssystem mit Smartphones konzipiert, entwickelt, implementiert und evaluiert. Das kooperative Positionierungssystem nutzt Distanzschätzungen zu Nachbargeräten sowie die Positionsangaben, welche über Ad-hoc-Netzwerke ausgetauscht werden, um eine Position mittels der Lateration zu berechnen. Die Smartphones nutzen dabei das Wi-Fi Direct, um einerseits Informationen auszutauschen und andererseits aus der Sensorinformation über die Signalstärke die Distanz zum Kommunikationspartner zu bestimmen. Die Untersuchungen des Sensorverhaltens haben gezeigt, dass die Signalstärke einer aufgebauten Wi-Fi Direct Verbindung

relativ hohen Schwankungen unterliegt. Dennoch wurde gezeigt, dass die Signalstärke als Maß für eine grobe Abschätzung der Distanz zwischen zwei verbundenen Geräten genutzt werden kann. Für das in dieser Arbeit entwickelte Positionierungssystem wurden dazu zwei verschiedene Propagierungsmodelle zur Berechnung der Distanzen anhand der Signalstärke verglichen. Für beide Modelle wurde eine Kalibrierung mit Trainingsdaten aus der Zielumgebung durchgeführt, um sie für den späteren Betrieb in der Testumgebung zu optimieren. Die Aufnahme von den Signalstärken der Wi-Fi Direct Verbindung als Kalibrierungsdaten erfolgte in einem *Line-of-Sight* Szenario, d.h. zwischen den Geräten bestand während der Kalibrierung stets Sichtkontakt. Bei einer auf Distanzen basierenden Positionierungsmethode, kann für ein oder zwei bekannte Positionen und Distanzen nur eine uneindeutige Positionierung erfolgen. Bei drei oder mehr Geräten bekannter Position ist die Positionierung eines weiteren Smartphones ohne bekannte Position im fehlerfreien Fall mittels Lateration eindeutig lösbar. Dazu wird der Schnittpunkt der Kreise um die Position benachbarter Sender mit der berechneten Distanz als Radius berechnet. Im fehlerbehafteten Fall ist eine Schnittpunktberechnung nicht möglich. Hierzu wurde eine Fehlerfunktion eingeführt, die mit dem Gauß-Newton-Verfahren numerisch minimiert wird. Das Minimum oder in manchen Fällen auch die Minima zeigen Punkte auf, deren Summe der Abstandsquadrate zu allen Kreislinien minimal sind. Da Signalstärken stark von den theoretisch erwarteten Werten abweichen können, werden in dem hier entwickelten Positionierungssystem drei verschiedene kooperative Algorithmen entwickelt, die zur Verbesserung der Distanz- bzw. Positionsberechnung führen sollen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Distanzberechnung ohne Nachbearbeitung in der Regel zu große Werte liefert und damit auch das Ergebnis der Positionierung beeinflusst. Durch die entwickelten und implementierten Optimierungsansätze wird gezeigt, dass sich der Fehler in der Distanzberechnung durch Kombination aller bekannten Größen erheblich reduzieren lässt. Infolgedessen sinkt auch der mittlere Fehler der Positionsbestimmung. Die Evaluierung zeigt, dass je nach Anzahl der Sender eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von zwei bis vier Metern erreicht werden kann. Die maximale Anzahl an Sendern beträgt dabei sieben, was in vielen öffentlichen Gebäuden deutlich übertroffen wird.

Mit der Entwicklung einer Android-Applikation wurde gezeigt, dass die Konzepte für das kooperative System in einem realen Gebäude eine robuste Positionsbestimmung ermöglichen. Für einen praxistauglichen Betrieb und eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung müssen zukünftige Systeme jedoch einige zusätzliche Aspekte berücksichtigen.

Das hier entwickelte kooperative Positionierungssystem berücksichtigt nicht die Heterogenität von Mobiltelefonen. In dieser Diplomarbeit standen vier gleiche Smartphones zur Verfügung, jedoch muss die Vielfalt der Mobiltelefone für ein allgemein nutzbares System betrachtet werden. Unterschiede in den Wi-Fi Antennen erfordern womöglich komplexere Propagierungsmodelle oder andersartige Trainingsverfahren.

Ein besseres Verständnis der Empfangscharakteristik in Gebäuden mit vielen mobilen Geräten und anderer Elektronik bietet noch großes Potential für Verbesserung. Die Untersuchungen auf Reproduzierbarkeit von festgestellten Signalstärken zeigten, dass selbst an einer fixen Position ohne erkennbare Veränderungen der Umgebung, die Signalstärke nicht annähernd konstant bleibt. Die entwickelten Algorithmen zeigen zwar, dass das Signalausrauschen durch die kooperativen Ansätze zwar kompensiert werden kann, dennoch würde jegliche Positionsberechnung von präziseren Distanzangaben profitieren.

Hohe Redundanz an Distanz- und Positionsdaten verbessert die Positionierung maßgeblich. Für ein erfolgreiches Positionierungssystem ist es deshalb notwendig, dass die entsprechenden Sensoren und Kommunikationsadapter dauerhaft aktiviert sind. Für die Zukunft ist wichtig, dass, sowohl die Funkadapter und Sensoren als auch die Software energiesparend funktionieren, da sonst die Akzeptanz für ein solches System fehlt.

In dieser Arbeit wurde bewusst auf die Berücksichtigung weiterer Sensoren und der Gebäudegeometrie und anderer Eigenschaften der Umgebung verzichtet, um ein universal einsetzbares System zur Verfügung zu stellen. Stehen zusätzliche Sensoren zur Verfügung, können diese das Ergebnis erheblich verbessern. Beispielsweise bieten Kurzdistanztechnologien wie NFC eine präzisere Distanzmessung für den Nahbereich. Ferner kann durch Hinzunahme von Gebäudegeometriedaten die berechnete Position auf den sinnvollen Gebäudebereich eingeschränkt werden. Dadurch wird verhindert, dass fehlerhafte Daten zu einer Positionsbestimmung außerhalb des begehbaren Bereichs führen. „Mobile Mapping“ Lösungen bieten hier eine vielversprechende Alternative zur klassischen Gebäudevermessung.

Ein weiterer Aspekt, der in dieser Diplomarbeit nicht berücksichtigt wurde ist die Privatsphäre. Ein technisch einwandfreies Positionierungssystem kann an der Akzeptanz scheitern, wenn die Ungewissheit besteht, wie die Daten des Einzelnen geschützt werden. Insbesondere personalisierte Positionsdaten sind kritisch und vor Missbrauch zu schützen.

Positionierungssysteme werden auch in naher Zukunft ein interessantes Forschungsthema bleiben. Es wird spannend zu beobachten, welche Technologie und welches Verfahren sich durchsetzen und wie die Anwendungen, die darauf aufbauend entwickelt werden, unseren Alltag verändern.

Literaturverzeichnis

- [1] Billur Barshan and Hugh F. Durrant-Whyte. Inertial Navigation Systems for Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(3):328–342, June 1995.
- [2] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART C APPLICATIONS AND REVIEWS*, 37(6):1067 – 1080, November 2007.
- [3] Binghao Li, James Salter, Andrew G. Dempster, and Chris Rizos. Indoor positioning techniques based on wireless LAN. In *LAN, FIRST IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS BROADBAND AND ULTRA WIDEBAND COMMUNICATIONS*, pages 13–16, 2007.
- [4] Wi-Fi Alliance. Wi-Fi CERTIFIED Wi-Fi Direct, 2010.
- [5] Joshua Bardwell. "You Believe You Understand What You Think I Said..."The Truth About 802.11 Signal And Noise Metrics. 2004.
- [6] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications: principles and practice*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ [u.a.], 2 edition, 2002.
- [7] Kaveh Pahlavan and Allen H. Levesque. *Wireless information networks*. Wiley, Hoboken, NJ [u.a.], 2 edition, 2005.
- [8] Paolo Barasocchi, Stefano Lenzi, Stefano Chessa, and Gaetano Giunta. A Novel Approach to Indoor RSSI Localization by Automatic Calibration of the Wireless Propagation Model. 2009.
- [9] Binghao Li, James Salter, Andrew G. Dempster, and Chris Rizos. Indoor positioning techniques based on wireless LAN. In *LAN, FIRST IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS BROADBAND AND ULTRA WIDEBAND COMMUNICATIONS*, pages 13–16, 2007.
- [10] Atreyi Bose and Chuan Heng Foh. A Practical Path Loss Model For Indoor WiFi Positioning Enhancement. 200.

-
- [11] Kamol Kaemarungsi and Prashant Krishnamurthy. Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting. In *Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, pages 14–23, 2004.
 - [12] Harald T. Friis. A Note on a Simple TRansmission Formula. In *Proceedings of the IRE*, volume 34, pages 254–256, 1946.
 - [13] Theofilos Chryskos, Giannis Georgopoulos, and Stavros Kotsopoulos. Site-Specific Validation of ITU Indoor Path Loss Model at 2.4 GHz. In *WoWMoM*, 2009.
 - [14] Hans Rudolf Schwarz und Norbert Köckler. *Numerische Mathematik*. Vieweg + Teubner, Paderborn, Deutschland, 7 edition, 2009.
 - [15] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 2, pages 775–784, 2000.
 - [16] Kaustubh Dhondge, Hyungbae Park, Baek-Young Choi, and Sejun Song. Energy-Efficient Cooperative Opportunistic Positioning for Heterogeneous Mobile Devices. 2012.
 - [17] Hirozumi Yamaguchiy, Takamasa Higuchi, and Teruo Higashinoy. Collaborative Indoor Localization of Mobile Nodes. *Information Processing Society of Japan*, pages 156–163, 2012.
 - [18] Li-wei Chan, Ji-rung Chiang, Yi-chao Chen, Chia-nan Ke, Jane Hsu, and Hao-hua Chu. Collaborative Localization – Enhancing WiFi-Based Position Estimation with Neighborhood in Clusters. In *Links in Clusters, Proc. Int’1 Conf. Prevasive Computing (Prevasive 2006)*, pages 50–66, 2006.
 - [19] Kamil Kloch, Paul Lukowicz, and Carl Fischer. Collaborative PDR Localisation with Mobile Phones. In *15th Annual International Symposium on Wearable Computers*, 2011.
 - [20] Santiago Mazuelas, Alfonso Bahillo, Ruben M. Lorenzo, Patricia Fernandez, Francisco A. Lago, Eduardo Garcia, Juan Blas, and Evaristo J. Abril. Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING*, 3(5):821–831, October 2009.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Stuttgart, den 02.08.2013