

# Universität Stuttgart

## Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik

Studienarbeit Nr. 2374

### **Innenraumpositionierung mit Smartphones**

Sanda Leko

**STUDIENGANG:** INFORMATIK

**PRÜFER:** PROF. DR. RER. NAT. DR. H.C.  
KURT ROTHERMEL

**BETREUER:** M.SC. PATRICK BAIER

**BEGONNEN AM:** 23.04.2012

**BEendet AM:** 23.10.2012

**CR-KLASSIFIKATION:** C.2.4, H.3.0



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

**NEXUS**

## **Zusammenfassung**

Kontextsensitive und ortsbezogene Anwendungen spielen in der heutigen mobilisierten Welt eine entscheidende Rolle. Mobile Geräte wie Smartphones besitzen oftmals Sensoren mit denen es möglich ist, die Position des Gerätes zu bestimmen. Für Außenbereiche bietet GPS eine einfache Möglichkeit die Position des Smartphones im Weltkoordinatensystem zu ermitteln. Für Innenbereiche ist GPS jedoch nicht ausgelegt. Die Signalstärken sind zu schwach, um Wände und Decken zu durchdringen. Für die Innenraumpositionierung existiert bisher kein einheitlicher Standard, mit dem das Smartphone seine Position in einer geschlossenen Umgebung festlegen kann. Die aktuelle Forschung zeigt jedoch, dass dies mit modernen Smartphones und der bestehenden Infrastruktur bewältigt werden kann.

In dieser Studienarbeit wird ein Innenraumpositionierungssystem entworfen und implementiert, das mittels verschiedener in Smartphones verfügbarer Sensoren die Position des Nutzers innerhalb von Gebäuden bestimmen und anzeigen kann. Ziel ist es dabei die durch schwankende Signalstärken fehleranfällige WLAN Fingerprinting-Methode bisheriger Arbeiten mit Hilfe anderer Sensoren zu optimieren. Das vorgestellte System verwendet dazu Bluetooth Beacons, Messdaten des im Smartphone vorhandenen Beschleunigungssensors und den Kompass. Das System berücksichtigt dabei die Berechnung der Position eines jeden Sensors und wertet anhand von Qualitätskriterien eine bestmögliche Position aus. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Zusammenführung von Informationen verschiedener Sensoren eine Verbesserung der WLAN Fingerprinting Methode erreicht werden kann.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	iii
Einleitung .....	1
1.1    Allgemeine Einleitung .....	1
1.2    Motivation .....	2
1.3    Ausblick .....	3
2    Grundlagen .....	4
2.1    Smartphones .....	4
2.2    Technologien .....	4
2.3    Innenraumpositionierung mit WLAN und Bluetooth Funknetzten .....	5
2.3.1    Signalstärken von WLAN und Bluetooth .....	5
2.3.2    Verfahren zur Innenraumpositionierung mit Signalstärken .....	5
2.3.3    Verfahren in der Szenen Analyse .....	7
2.4    Verwandte Arbeiten .....	8
3    Ansatz .....	10
4    Abgrenzung .....	10
5    Innenraumpositionierung mit Smartphones .....	11
5.1    Systemaufbau .....	11
5.1.1    Gebäude .....	11
5.1.2    Infrastruktur .....	12
5.1.3    Smartphones .....	13
5.1.4    Datenbank .....	13
5.1.5    Systeminfrastruktur .....	14
5.2    Konzept .....	14
5.2.1    Offline-Phase .....	14
5.2.2    Online Phase .....	15
5.2.3    Visualisierung .....	17
5.3    Umsetzung .....	18
5.3.1    Offline-Phase .....	18
5.3.2    Online-Phase .....	31
6    Evaluierung .....	46
6.1    Evaluierungsverfahren .....	46
6.1.1    Referenzpunkte und Testumgebung .....	46

6.2	Ergebnisse.....	50
6.2.1	WLAN.....	50
6.2.2	Bluetooth.....	54
6.2.3	Beschleunigungssensor .....	57
6.2.4	Kombinierte Positionsbestimmung .....	60
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	64
	Literaturverzeichnis.....	67

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trilateration .....	6
Abbildung 2: Testumgebung zweites Obergeschoss .....	12
Abbildung 3: Systeminfrastruktur .....	14
Abbildung 4: Datenbankschema .....	15
Abbildung 5: Ablauf der online-Phase .....	16
Abbildung 6: WLAN Signalstärken in einem Punkt .....	18
Abbildung 7: WLAN Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung .....	20
Abbildung 8: WLAN Signalstärken in Abhängigkeit der Entfernung zu einem Punkt .....	21
Abbildung 9: Bluetooth Signalstärken in einem Punkt .....	23
Abbildung 10: Bluetooth Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung .....	24
Abbildung 11: Bluetooth Signalstärken in Abhängigkeit der Entfernung zu einem Punkt .....	25
Abbildung 12: Bluetooth Sender und seine Sichtbarkeit über einen Korridor .....	26
Abbildung 13: Bluetooth Sender in der Testumgebung .....	27
Abbildung 14: Aufnahme von Bluetooth Daten .....	28
Abbildung 15: Beispiel eines Fingerprints .....	30
Abbildung 16: Koordinatensystem für Beschleunigungs- und Magnetfeldsensor des Smartphones [14] .....	32
Abbildung 17: Beschleunigung entlang der x-Achse .....	33
Abbildung 18: Beschleunigung entlang der y-Achse .....	33
Abbildung 19: Beschleunigung entlang der z-Achse .....	34
Abbildung 20: Ideale Euklidische Distanz .....	35
Abbildung 21: Beispiel möglicher MAC-Adressen und ihrer Signalstärken im Online- und Referenzpunkt .....	35
Abbildung 22: Bluetooth Signalstärken des Senders 00:02:72:23:FF:33 .....	37
Abbildung 23: Positionen der Aufnahme von Bluetooth Signalen .....	37
Abbildung 24: Weltkoordinatensystem [16] .....	38
Abbildung 25: Koordinatensystem für die Ausrichtung [16] .....	39
Abbildung 26: Schritterkennung .....	40
Abbildung 27: Ausrichtung .....	41
Abbildung 28: Ideale Kostenfunktion .....	42
Abbildung 29: Unscharfe Kostenfunktion: Das Minimum erstreckt sich über mehrere Referenzpunkte hinweg .....	42
Abbildung 30: Mehrdeutige Kostenfunktion: Durch Störeinflüsse weisen andere Stellen ähnlich niedere Kosten auf .....	43
Abbildung 31: Falsche Kostenfunktion: Durch Störeinflüsse weist die richtige Stelle nicht die minimalen Kosten auf .....	43
Abbildung 32: Verfahren bei Begünstigung von Positionen nahe der Bewegungserkennung .....	44
Abbildung 33: Referenzpunkte in der Testumgebung .....	47
Abbildung 34: Abdeckung von WLAN in der Testumgebung .....	48
Abbildung 35: Anzahl sichtbarer WLAN Access Points in jedem Referenzpunkt .....	48
Abbildung 36: Abdeckung von Bluetooth in der Testumgebung .....	49
Abbildung 37: Gesamtabweichung bei Ignorieren von fehlenden Adressen und $k = 2$ .....	51
Abbildung 38: Maximaler Fehler unter Berücksichtigung fehlender Adressen .....	52
Abbildung 39: Mittlerer Fehler unter Berücksichtigung fehlender Adressen .....	53

Abbildung 40: Standardabweichung unter Berücksichtigung fehlender Adressen .....	53
Abbildung 41: Signalstärkenverlauf des Bluetooth Senders mit der Adresse 00:19:15:49:ED:A1.....	55
Abbildung 42: Signalstärkenverlauf des Bluetooth Senders mit der Adresse 00:02:72:23:FF:83.....	55
Abbildung 43: signalstärkenverlauf des Senders mit der Adresse 00:02:72:23:FF:74.....	56
Abbildung 44: Bewegungsprofil .....	57
Abbildung 45: Schritte und Ausrichtung Bewegungsprofil Nord-Ost.....	58
Abbildung 46: Schritte und Ausrichtung Bewegungsprofil Süd-West.....	58
Abbildung 47: Abweichung von der tatsächlichen Position Bewegungsprofil Nord-Ost.....	59
Abbildung 48: Abweichung von der tatsächlichen Position Bewegungsprofil Süd-West .....	60
Abbildung 49: Maximaler Fehler bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung .....	61
Abbildung 50: Mittlerer Fehler bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung.....	61
Abbildung 51: Standardabweichung bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung .....	62
Abbildung 52: Verbesserung der Genauigkeit durch Kombination von Sensoren.....	63

# Einleitung

## 1.1 Allgemeine Einleitung

Kontextsensitivität in Bezug auf Anwendungen wird in der heutigen digitalisierten und mobilen Welt immer bedeutender. Die technologische Entwicklung der letzten Jahre ermöglichte eine zunehmende Mobilität der Menschen. Wir sind heute in der Lage in relativ kurzer Zeit große Distanzen zu überbrücken. Diese Eigenschaft führte dazu, dass man sich mit dem Problem der genauen Positionsbestimmung von nicht statischen Objekten befasst.

Die Idee der Positionsbestimmungen ist natürlich für Außenbereiche sowie für Innenbereiche interessant. Für Außenbereiche bietet das Global Positioning System, kurz GPS [1] eine gute Möglichkeit Positionen im Weltkoordinatensystem zu bestimmen. Jedoch unterliegen GPS Signale Störeinflüssen die durch Elemente eines Gebäudes verursacht werden und können deshalb in Innenräumen nicht zur Positionierung verwendet werden.

Innenraumpositionierung bietet eine erhebliche Unterstützung für das Navigieren in großen Gebäuden wie Krankenhäusern, Kaufhäusern, Museen oder Flughäfen. Doch nicht nur das Navigieren durch verschiedene Räume kann von Bedeutung sein, sondern auch die Information die damit gewonnen wird. Anwendungen können die Position verwenden, um kontextsensitive Inhalte anzuzeigen. Beispielsweise kann mit der Positionsbestimmung in Kaufhäusern gezielte Werbung betrieben werden. Ein anderes Beispiel sind Spiele, die positions- und bewegungsabhängig sind, wie zum Beispiel eine Schatzsuche.

Die meisten großen, frei zugänglichen Gebäude nutzen für ihre eigenen Zwecke drahtlose Technologien. Der bekannteste Vertreter ist das Wireless Access Network, kurz WLAN [1]. Durch die statische Infrastruktur und die eindeutige Identifizierung der Sender, eignen sich die meisten Standards für drahtlose Kommunikation auch zur Positionsbestimmung. Da WLAN fast überall verfügbar ist, wird diese Infrastruktur bevorzugt zur Innenraumpositionierung verwendet. Weitere Möglichkeiten zur Innenraumpositionierung sind die Nutzung von Bluetooth, Infrarot, Near-Field-Communication, Radio Frequency Identification oder der Ultrabreitband Technologie. Die Innenraumpositionierung kann also unterschiedlich realisiert werden. Die verschiedenen Technologien unterscheiden sich in der Genauigkeit bei der Berechnung der Position, der Verbreitung der benötigten Geräte und den Investitionskosten für zusätzliche Hard- und Software. Je nach Anforderungen wird auf verschiedene Technologien zurückgegriffen.

Die Positionsbestimmung nicht statischer Objekte in Innen- und Außenbereichen wird durch heutige Mobilgeräte ermöglicht. Sie sind mit ihren eingebauten Sensoren in der Lage, unterschiedliche für die Positionierung relevante Informationen zu sammeln. Die eingebauten Sensoren der Mobilgeräte bieten damit eine Plattform, die keiner weiteren Sensor Infrastruktur bedarf. Die Sammlung von Daten mit Hilfe eingebauter Sensoren mobiler Geräte wird auch als Public Sensing bezeichnet [2] [3].

## 1.2 Motivation

Positionierungssysteme haben in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Bisher fiel die Wahl der verwendeten Technologie meist auf WLAN. Eine WLAN-Infrastruktur ist in nahezu allen öffentlichen Gebäuden, in denen Positionierung wichtig ist, bereits zu Kommunikationszwecken vorhanden. WLAN bietet somit die Möglichkeit Positionierung und Datentransfer mit nur einer Technologie zu realisieren.

Die Positionierung mit WLAN ist in Außen- und Innenbereichen möglich. Im Innenbereich ist die Bestimmung der Position mit WLAN jedoch fehleranfällig da WLAN Access Points eine relativ hohe Reichweite besitzen und die Signalausbreitung durch vielerlei Effekte wie Beugung, Dämpfung, Brechung und Reflexion beeinträchtigt werden. Durch Informationen einer zusätzlich installierten Infrastruktur kann das Ergebnis der WLAN-Positionierung verbessert werden. Bluetooth beispielsweise ist für diese Zwecke eine einfache und kostengünstige Option. Die im Gegensatz zu WLAN viel kleinere Reichweite von Bluetooth-Sendern ermöglicht es, den möglichen Aufenthaltsort des Nutzers beim Empfang von Signalen auf den Senderadius einzuschränken. Durch bewusste Platzierung von Bluetooth Hotspots im Gebäude kann somit eine Optimierung der WLAN Positionierung stattfinden. Bluetooth als einzige Infrastruktur zur Innenraumpositionierung erfordert jedoch Investitionen in zusätzliche Hardware, eine Sicherstellung der kontinuierlichen Energieversorgung der Sender und komplexere Systeme zum Austausch der bekannten Positionen.

Moderne Mobilgeräte bieten neben WLAN und Bluetooth noch eine Vielzahl anderer integrierter Sensoren an, die ebenfalls zur Ortung innerhalb von Gebäuden beitragen können. Die wichtigsten sind der Beschleunigungssensor, der Bewegungen abschätzen kann und der Kompass, welcher die Orientierung des Geräts bezüglich des Erdmagnetfeldes bestimmt. Beide Sensoren haben den Vorteil, energieeffizient und ohne zusätzliche Infrastrukturkosten für die Positionierung eingesetzt werden zu können.

Die Kombination verschiedener Sensoren in einem Positionierungssystem ermöglicht es die Nachteile eines Sensors durch die anderen zu kompensieren. Das Prinzip wird in dieser Studienarbeit verfolgt. Dazu werden die Schwächen von WLAN-Positionierungsmethoden untersucht und ein Ansatz entwickelt, wie andere Sensoren dazu beitragen können, diese Schwächen zu kompensieren und damit eine robuste Positionierung ermöglichen.

### **1.3 Ausblick**

Diese Studienarbeit ist folgendermaßen gegliedert: Das zweite Kapitel behandelt Grundlagen bezüglich Innenraumpositionierung mit modernen Smartphones. Dabei wird zunächst die Ausstattung eines Smartphones vorgestellt und anschließend auf die verschiedenen Technologien eingegangen. Ferner befasst sich das Kapitel mit der Innenraumpositionierung basierend auf bestehenden Funknetzen in Gebäude. Dabei werden die Eigenschaften von verschiedenen Funknetzen erläutert und Verfahren zur Innenraumpositionierung vorgestellt. Abschließend wird ein Überblick über verwandte Arbeiten aus diesem Themengebiet gegeben.

Kapitel 3 stellt den Ansatz dieser Arbeit vor. In Kapitel 4 werden die Unterschiede zu verwandten Arbeiten erläutert.

Kapitel 5 schildert den Aufbau und die Umsetzung des vorgeschlagenen Positionierungssystems in dieser Studienarbeit. Dazu wird auf die einzelnen Teile der Systeminfrastruktur eingegangen, sowie das Konzept zur Umsetzung vorgestellt. Der letzte Abschnitt des Kapitels beschreibt detailliert die Umsetzung des Positionierungssystems.

In Kapitel 6 wird das vorgestellte System evaluiert. Dazu wird zunächst erläutert, mit welchen Methoden sich das System evaluieren lässt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Evaluierung vorgestellt und erläutert.

Kapitel 7 gibt eine kurze Zusammenfassung der behandelten Themen und einen Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Smartphones

Mobile Geräte wie Smartphones, Personal Digital Assistants, kurz PDAs oder Notebooks sind mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren ausgestattet.

Touchscreen, Kamera und Mikrofon sind beispielsweise Sensoren die bei der heutigen Ausstattung eines Smartphones unabdingbar sind. Ein Smartphone ist typischerweise auch mit Funksensoren wie WLAN oder Bluetooth ausgestattet. Der WLAN Sensor ermöglicht dem Smartphone einen Zugang zum Internet. Der Bluetooth Sensor dient in der Regel zur Datenübertragung zwischen verschiedenen Geräten sowie der Anbindung von Peripheriegeräten an das Smartphone. Ferner besitzt das Smartphone Sensoren wie zum Beispiel den Beschleunigungssensor, der die Beschleunigung des Gerätes misst, den Kompass der die Himmelsrichtung bestimmt oder auch den Magnetfeldsensor für die Messung des Magnetfelds.

### 2.2 Technologien

Vor dem Hintergrund der stetig zunehmenden Mobilitätsbedürfnisse und deren Gewährleistung, ist der Aufbau von nachhaltigen und zweckgebundenen Infrastrukturen eine unverzichtbare Voraussetzung. Das Global Positioning System, kurz GPS [1], ist ein Navigationssatellitensystem. Ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt, stellt es heute das bekannteste und am meisten angewendete Positionierungssystem für Außenbereiche dar. Die Navigation ist mit Hilfe von GPS einfach geworden, denn jedes Gerät das in der Lage ist GPS Signale zu empfangen, kann seine Position im Weltkoordinatensystem berechnen und seine Geschwindigkeit bestimmen. Auf dieser Technologie basieren insbesondere Navigationssysteme in Autos oder Flugzeugen.

Mobilfunknetze sind Infrastrukturen die eine Kommunikation zwischen mobilen Telefonen ermöglichen. Der bekannteste Standard für Mobilfunknetze ist das Global System for Mobile Communication, kurz GSM [4], der inzwischen auch die Funktion von Datenübertragungen beinhaltet. Darauf aufbauend wurden weitere Standards wie bspw. General Radio Packet Service, kurz GPRS, das Universal Mobile Telecommunication System, kurz UMTS sowie Long Term Evolution, kurz LTE, entwickelt. Mit Hilfe von Mobilfunknetzen ist es möglich eine Grobpositionierung mobiler Telefone durchzuführen.

GPS und die unterschiedlichen Standards der Mobilfunknetze eignen sich nicht für Positionsbestimmungen innerhalb von Gebäuden. Innenraumpositionierungen erfordern höhere Genauigkeiten als im Außenbereich. GPS erreicht aber hier seine Grenzen, denn GPS Signale unterliegen starken Schwankungen die beispielweise durch Dächer oder Wände hervorgerufen werden. Mobilfunknetze können selbst im Außenbereich nur eine grobe Eingrenzung der Position bestimmen und sind daher kein valider Ansatz für eine Innenraumpositionierung.

Infrarot oder auf Radiofrequenzen basierende Technologien wie Radio Frequency Identification RFID, Ultra Wide Band UWB, Ultra High Frequency UHF, Wireless Access Network WLAN und Bluetooth können eher zur Innenraumpositionierung herangezogen werden [1].

Das Wireless Access Network ist ein Funknetz, welches in den letzten Jahren groß an Bedeutung gewonnen hat. Der aktuell dominierende Standard bei WLAN ist IEEE 802.11x. Seine Reichweite liegt circa zwischen 50 - 100m.

Endgeräte wie Computer und Mobiltelefone besitzen einen Wireless Adapter. Dieser dient zur Erstellung einer Funkkommunikation mit dem Wireless Access Point, einem Gerät das als Basisstation fungiert und an ein Kommunikationsnetz anbindet.

Bluetooth ist ein weiterer Standard aus dem Bereich Funkloser Netzwerke basierend auf Radio Frequenzen. Dies ist ein leistungseffizienter Standard, dessen Reichweiten zwischen 10 – 15m liegen. Die Funkkommunikation erfolgt ebenfalls über eine Funkzelle, die auch als Hotspot bezeichnet wird.

## **2.3 Innenraumpositionierung mit WLAN und Bluetooth Funknetzten**

Der Vorteil einer Innenraumpositionierung mit einer funkbasierten Infrastruktur wie WLAN zeichnet sich dadurch aus, dass diese bereits in den meisten öffentlichen Gebäuden in denen Positionierungen wichtig erscheinen, schon vorhanden sind. Es erfordert daher keinen zusätzlichen Aufwand zur Implementierung einer eigenen Infrastruktur und stellt damit eine kostengünstige Variante dar.

Innenraumpositionierung mit Hilfe von Bluetooth ermöglicht durch seine kleineren Reichweiten eine verhältnismäßig gute Eingrenzung möglicher Positionen in einem Gebäude. Diese sind zwar nicht wie WLAN überall verfügbar, stellen aber im Vergleich zu anderen Technologien wie beispielweise Infrarot eine kostengünstigere Lösung dar. Bluetooth kann entweder in Kombination mit anderen Technologien oder auch gesondert zur Innenraumpositionierung verwendet werden.

### **2.3.1 Signalstärken von WLAN und Bluetooth**

Die Funkzellen bzw. Sender von WLAN und Bluetooth versenden kleine Datenpakete, die unterschiedliche Informationen über den Sender beinhalten. Unter Anderem sind dies die MAC-Adresse und der Name des jeweiligen Senders. Alle sich im Empfangsbereich befindenden Geräte mit einer entsprechenden Schnittstelle sind in der Lage diese Informationen zu empfangen.

Die Signalstärke, die bei dem empfangenden Gerät gemessen wird, hat eine große Bedeutung für funkbasierende Positionierungssysteme. Sie ändert sich mit der Entfernung zum Sender und besitzt idealerweise einen logarithmischen Verlauf. Dies ist aber in der Realität selten der Fall, denn die Signale werden durch unterschiedliche Störeinflüsse verändert oder gar blockiert. Wände, Beugungen, Reflektionen oder auch der menschliche Körper haben einen hohen Einfluss auf die Messwerte der Signalstärken.

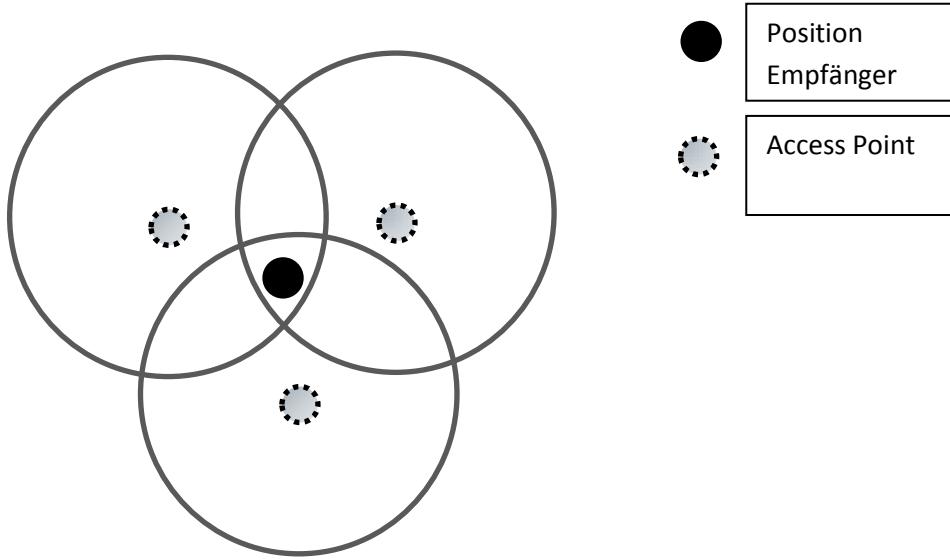
### **2.3.2 Verfahren zur Innenraumpositionierung mit Signalstärken**

Drahtlose Methoden zur Innenraumpositionierung nutzen eine bestimmte Funktechnologie sowie einem Algorithmus zur Bestimmung der Position in Innenräumen. Verschiedene Verfahren zur Positionsbestimmung finden in der Praxis Anwendung [1]:

1. Triangulation
2. Szenenanalyse

Die Triangulation kann durch Abstands- oder Winkelmaße realisiert werden. Bei der Trilateration werden Abstand bzw. Entfernung zwischen Sender und Empfänger berücksichtigt. Dabei wird für jeden Sender eine Kreisfunktion aufgestellt mit der Entfernung zum Empfänger als Radius. Als Entfernungsmaß kann die beim Empfänger gemessene Signalstärke des Senders genutzt werden.

Sind so mindestens drei Kreisfunktionen aufgestellt, kann durch den Schnittpunkt dieser, die Position des Empfängers bestimmt werden.



**Abbildung 1: Trilateration**

Die Herausforderung bei diesem Verfahren sind korrekte Entfernungsmessungen. Wird die Entfernung zu groß oder zu klein bestimmt, sind weitere Berechnungen notwendig um das Gebiet einzuschränken bzw. zu erweitern so dass ein eindeutiger Schnittpunkt entsteht.

Die zweite Möglichkeit der Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden ist die Szenenanalyse. Bei der Szenenanalyse werden zunächst Merkmale aus der Umgebung extrahiert und zur Bestimmung der Positionen herangezogen.

Ein Beispiel aus der Szenenanalyse stellt die Fingerprinting Methode dar. Die Fingerprinting Methode besteht aus zwei verschiedenen Phasen. Die erste, Offline-Phase dient zur Sammlung von Daten den sogenannten Fingerprints. Die zweite Online-Phase nutzt diese Daten als Referenz in Kombination mit verschiedenen Algorithmen um eine Position zu berechnen. Fingerprinting hat den Nachteil, dass ein großer Arbeitsaufwand in der Aufbereitung der Referenzdaten erforderlich ist.

Verfahren die mit der Fingerprinting Methode verwendet werden können, sind unter anderem Euklidische Distanzen, Nearest Neighbor, probabilistische Algorithmen und Neurale Netze.

Eine weitere Möglichkeit Signalstärken zur Innenraumpositionierung heranzuziehen ist zum Beispiel die Betrachtung der Propagation von Signalen. Bei der Propagation werden die Signalstärken nicht direkt gemessen, sondern vielmehr mit entsprechenden Annahmen über ihr Verhalten bei verschiedenen Hindernissen bzgl. der erwarteten Stärke berechnet.

### 2.3.3 Verfahren in der Szenen Analyse

#### 2.3.3.1 Euklidische Distanz

Die einfachste Umsetzung der Positionsbestimmung bei Betrachtung von Signalstärken ist die Euklidische Distanz. Dabei werden die aktuellen Signalstärken der Infrastruktur im Gebäude mit den Fingerprints bzw. Referenzdaten verglichen und der Referenzpunkt mit der kleinsten Distanz als Position zurückgegeben. Die Distanz zu einem Referenzpunkt berechnet sich folgendermaßen [5]:

$$d_i = \sqrt{\sum_j (S_{ij} - S_{mj})^2}$$

Dabei bezeichnet  $S_{ij}$  den Signalwert des Senders j, gemessen am Referenzpunkt i und  $S_{mj}$  den Signalwert von j gemessen an der online Position m.

#### 2.3.3.2 Probabilistische Verfahren

Das Bayessche Netz [6] beschreibt einen gerichteten, azyklischen Graphen mit Knoten denen Zufallsvariablen und ihre bedingten Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden.

Da hier zuerst die Zufallsvariablen und ihre probabilistischen Beziehungen untereinander bestimmt werden, können nicht alle bedingten Wahrscheinlichkeiten unmittelbar aus dem Suchraum berechnet werden. Das Bayes Theorem liefert hierfür einen Ansatz:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)}$$

Angewandt auf das Problem der Innenraumpositionierung kann eine Anzahl von möglichen Positionen  $I_1$  bis  $I_n$  und ihre Wahrscheinlichkeiten  $P(I_1) = \dots = P(I_n)$  klassifiziert werden [1]. Wird beispielsweise eine Signalstärke s in der Online-Phase aufgenommen dann ergibt sich mit  $P(I_j|s)$  die Wahrscheinlichkeit, dass sich das mobile Gerät unter dieser Signalstärke an der Position  $I_j$  befindet. Mit Hilfe der Bayes Regel und  $P(s|I_j)$  kann die Wahrscheinlichkeit letztendlich berechnet und die höchste als Position zurückgegeben werden.

#### 2.3.3.3 k-Nächste Nachbarn Verfahren

Das k-Nächste Nachbarn Verfahren [1] stellt eine sehr einfache Methode dar um Objekte zu einer bestimmten Klasse zuzuordnen. Es basiert auf einem maschinellen Lernverfahren das „Lazy Learning“ genannt wird. Dabei werden in der ersten Phase die Trainingsdaten abgespeichert. In der Auswertungsphase wird auf diese Daten zurückgegriffen indem k minimale Distanzen zwischen dem zu klassifizierenden und den gespeicherten Objekten bestimmt werden. Das Objekt wird anschließend der Klasse zugeordnet, in der die Mehrheit seiner k Nachbarn enthalten ist.

Als Distanz kann beispielweise der Euklidische Abstand der Signalstärken dienen. Ferner besteht die Möglichkeit den k Nachbarn unterschiedliche Gewichte zu verteilen.

## 2.4 Verwandte Arbeiten

Einer der ersten Systeme, die mit Hilfe von WLAN Signalstärken und mobilen Geräten versucht haben ihre Position innerhalb von Gebäuden zu bestimmen, war RADAR [7]. RADAR fokussierte sich einerseits auf die Fingerprinting Methode mit dem k-Nächste Nachbarn Verfahren sowie der Propagierung von Signalen. Schon damals erkannte man die Bedeutung der Ausrichtung, da WLAN Signale unterschiedliche Werte an einer Position aufwiesen, abhängig von der Ausrichtung des Mobilgeräts.

COMPASS [8] ist einer der ersten probabilistischen Systeme zur Innenraumpositionierung der ähnlich wie RADAR die Auswirkung der Ausrichtung beachtet. In der Offline-Phase werden die WLAN Signalstärken für unterschiedliche Ausrichtungen aufgenommen. In der Online-Phase wird anschließend mit Hilfe eines digitalen Kompasses die Ausrichtung des Mobilgeräts bzw. seines Nutzers bestimmt und zur Selektion der gespeicherten Fingerprints genutzt. Ein probabilistischer Algorithmus dient zur Berechnung der Position.

Kessel und Werner entwickelten SMARTPOS [9], ein System zur Innenraumpositionierung mit einem Smartphone, welches ebenfalls WLAN Signalstärken auswertet. SMARTPOS basiert auf der deterministischen WLAN Fingerprinting Methode und benutzt einen digitalen Kompass um die Ausrichtung des Smartphones zu bestimmen. In der Offline-Phase werden die Pixelkoordinaten der Referenzpunkte, zusammen mit der Ausrichtung sowie der Signalstärken verfügbarer WLAN Access Points in einer Referenzdatenbank gespeichert. In der Online-Phase werden die aufgenommenen mit den in der Datenbank abgelegten Werten, unter Berücksichtigung der Ausrichtung, verglichen. Zur Positionsbestimmung wurde ein gewichteter k-Nächster Nachbar angewendet.

In [10] wird die Fingerprinting Methode in Kombination mit der Propagierung von WLAN Signalen benutzt. Anhand von bestimmten Eigenschaften, die für die Propagierung von Signalen angenommen werden, wird in der Offline-Phase eine Fingerprinting Karte erstellt die eine erwartete Signalstärke bekannter Sender in allen betrachteten Punkten speichert. Damit sollte der Aufwand der Offline-Phase reduziert werden denn bei Änderungen der Szene sind keine neuen Messwerte notwendig, sondern nur eine Berechnung der Fingerprinting Karte. Zur Bestimmung der Position werden die Verfahren Nächste Nachbar, k-Nächste Nachbarn, gewichteter k-Nächster Nachbar und ein auf Fuzzylogik basierender Algorithmus angewandt.

Ein anderes Beispiel, dass ebenfalls auf der Auswertung von WLAN Signalstärken und der Fingerprinting Methode basiert, benutzt PDAs als mobiles Gerät [5]. In dieser Arbeit wurden verschiedene mathematische Ansätze zur Bestimmung der Position verwendet. Mit der Euklidischen Distanz wurde in der Online-Phase der Punkt aus der Referenzdatenbank mit der minimalen Distanz als aktuelle Position ausgegeben. Ferner wurden ISOLINES und das Bayessche Theorem getestet.

Ein sehr ähnlicher Ansatz wie er auch in dieser Arbeit vorgestellt und diskutiert wird ist der hybride Ansatz zur Innenraumpositionierung in [11]. Die bestehende WLAN Infrastruktur wird durch die Installierung von Bluetooth Sendern ergänzt. Beide Infrastrukturen werden anschließend zur Positionierung verwendet. Die Bluetooth Sender wurden so positioniert, dass sie den Suchraum in Regionen einteilen und damit reduzieren. Werden Bluetooth Signale eines Senders empfangen, wird die bekannte Position dieses Senders als die Position im Gebäude zurückgegeben andernfalls wird mit Hilfe von WLAN Fingerprinting auf Euklidischen Distanzen der Signalstärken gearbeitet.

Die obigen Beispiele verwenden alle die Sensoren der mobilen Geräte in Kombination mit der Funkinfrastruktur im Gebäude. Einige Ansätze versuchen unabhängig der Funkinfrastruktur im Gebäude Positionen zu bestimmen und sich dabei nur auf die eingebauten Sensoren des Gerätes zu stützen.

In [12] wird beispielsweise zur Innenraumpositionierung die im Mobilgerät eingebaute Kamera und der Kompass verwendet. In der Offline-Phase wird eine Datenbank von Referenzpanoramabildern der Testumgebung generiert. Mit Hilfe des Kompasses und der aufgenommen Bilder kann dann in der Online-Phase die genaue Position des Mobilgeräts bestimmt werden.

In [13] wird zuerst durch das GPS festgestellt in welchem Gebäude sich der Nutzer bzw. das Mobilgerät befindet. Anschließend wird dann auf den Beschleunigungssensor zurückgegriffen um die Etage zu bestimmen. Durch Untersuchungen des Verhaltens von dem Beschleunigungssensor bei beispielsweise Treppen steigen oder Aufzug fahren, konnte ein geeignetes Muster extrahiert werden mit dem das System trainiert wurde.

### 3 Ansatz

In dieser Studienarbeit wird ein auf WLAN 802.11 Fingerprinting, Bluetooth sowie Beschleunigungssensor und Kompass basierendes Innenraumpositionierungssystem entwickelt. Fingerprints stellen dabei die MAC-Adressen und Signalstärken der Sender dar.

Die Idee dieser Studienarbeit ist mit den Sensoren eines Smartphones Daten der WLAN Infrastruktur, während der Offline-Phase im Gebäude aufzunehmen. Adress- und Signalinformationen der jeweiligen Sender werden als Fingerprints in einer Datenbank gehalten. Während der Online-Phase werden die aktuellen vom Smartphone empfangenen Informationen der Infrastruktur mit den Referenzdaten aus der Datenbank verglichen. Dieser Abgleich führt zur Bestimmung der Position des Smartphones im Gebäude. Dazu wird ein gewichteter k-Nächster Nachbar basierend auf der Euklidischen Distanz der Signalstärken implementiert. Die Nutzung der Daten von stationären Bluetooth Hotspots und des im Smartphones vorhandenen internen Beschleunigungssensors sowie Kompasses optimiert die mit WLAN berechnete Position.

### 4 Abgrenzung

Der Ansatz in dieser Studienarbeit ist relativ ähnlich dem Hybriden Ansatz in [11] und der WLAN Positionierung in [9]. Das Ziel dieser Arbeit ist jedoch die Komplexität von Multisensoring zu reduzieren und durch Kombination verschiedener Sensoren genauere Bestimmungen der Position zu erreichen. Die Positionierung in [9] nutzt nur die WLAN Infrastruktur im Gebäude. Im Gegensatz zu der WLAN Positionierung beim Hybriden Ansatz ermöglicht das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit nicht nur eine Positionsbestimmung durch Klassifizierung zu einem Referenzpunkt sondern auch eine Interpolation zwischen den verschiedenen Referenzpunkten. Ferner betrachtet dieses Positionierungssystem die Ausrichtung bei den Messungen.

Das Positionierungssystem in dieser Arbeit unterscheidet sich von den beiden anderen Ansätzen durch die Nutzung der Informationen des Beschleunigungssensors und Kompasses mit denen die Positionsbestimmung verfeinert wird.

## 5 Innenraumpositionierung mit Smartphones

### 5.1 Systemaufbau

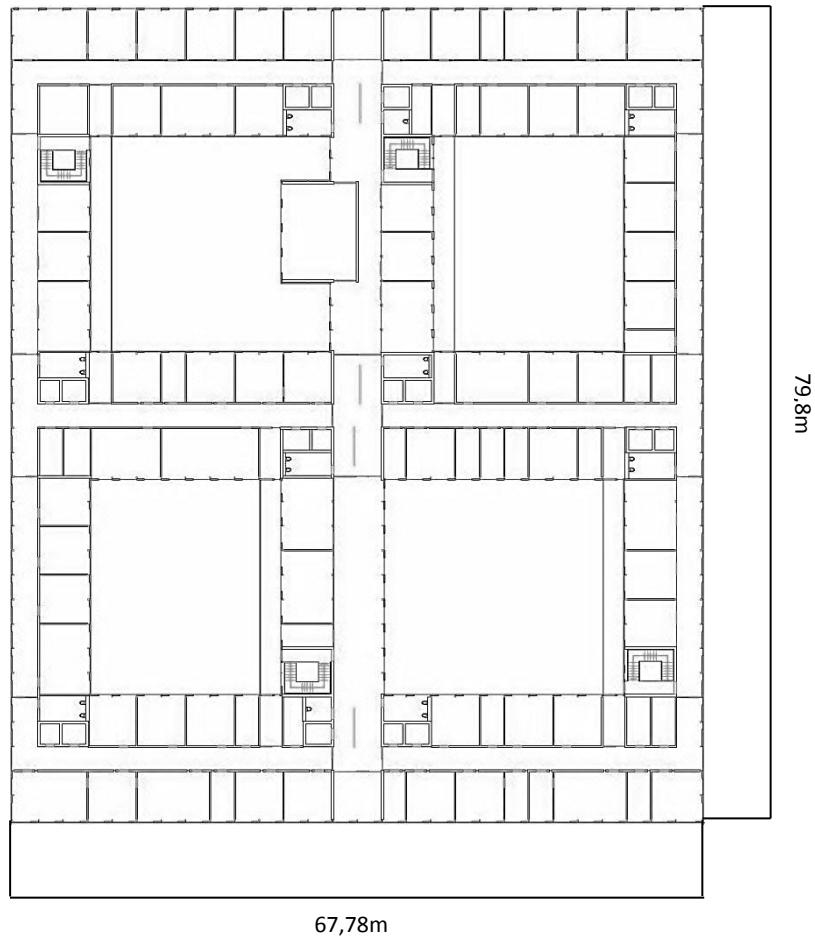
#### 5.1.1 Gebäude

Große Umgebungen, in denen Positionsbestimmung wichtig wäre, bestehen meistens aus langen Fluren, die auf verschiedene Stockwerke aufgeteilt sind. Ziel ist es, mit Hilfe der Sensoren eines Smartphones die Position auf den begehbarsten Wegen zu bestimmen, z.B. in welchem Flur und vor welchem Zimmer befindet sich der Nutzer und sein Smartphone zum jeweiligen Zeitpunkt.

Die Testumgebung für das in dieser Studienarbeit entwickelte System befindet sich im zweiten Obergeschoss des Informatik Gebäudes an der Universität Stuttgart. Das Informatik Gebäude besteht insgesamt aus drei Stockwerken. Jedes Stockwerk kann in vier verschiedene Quadranten aufgeteilt werden. Die Quadranten zeichnen sich durch lange Flure bzw. Korridore aus, an denen sich beidseitig Büroräume befinden. Die Büros haben unterschiedliche Breiten, die von ca. 2m – 10m variieren können.

Abbildung 2 zeigt maßstabsgetreu das zweite Obergeschoss des Informatik Gebäudes. Die vier unterschiedlichen Quadranten sind klar erkennbar. Vertikal erstreckt sich durch die Mitte sowie an der linken und rechten Seite des Bildes jeweils ein Korridor über nahezu die ganze Länge des Stockwerks. Auch für die horizontale Ausrichtung können drei große Korridore identifiziert werden und zwar durch die Mitte sowie im oberen und unteren Teil der Abbildung. Die durch dunkle Linien eingerahmten Bereiche stellen Büros in unterschiedlichen Größen dar. Die hell schattierten Stellen auf den eingerahmten Bereichen sind Türen. Ferner sind im vertikal ausgerichteten, mittleren, großen Korridor vier hellere Linien abgebildet. Diese sind Wände als Raumteiler innerhalb des Korridors. Außerdem sind in diesem Teil noch zwei horizontale Linien ersichtlich. Diese stellen zwei Glaswände mit Glastüren dar. Die Glaswände und Glastüren sind auch bei den beiden äußeren vertikalen Korridoren vorhanden. Diese sind durch jeweils vier horizontale Linien dargestellt.

Die seitlichen Annotationen in Abbildung 2 stellen die Korridorlängen in Metern dar. Die Gesamtgröße beträgt  $69,78 \times 79,8 \text{ m}^2$ . Für die Verwendung des Kompasses wurde die Nordausrichtung des Plans geschätzt.



**Abbildung 2: Testumgebung zweites Obergeschoss**

### 5.1.2 Infrastruktur

Die Funkinfrastruktur in einem Gebäude kann unterschiedlich aufgebaut sein. Die meisten öffentlichen Gebäude besitzen heutzutage eine abdeckende WLAN Infrastruktur. Für die Innenraumpositionierungen sind sie daher besonders attraktiv, weil kein zusätzlicher Aufwand zum Aufbau einer eigenen Infrastruktur notwendig ist. Zusätzlich können auch andere Funkstandards wie Bluetooth oder Infrarot vorhanden sein.

Das oben beschriebene Informatik Gebäude der Universität Stuttgart besitzt eine große Anzahl von Access Points für verschiedene WLAN Netze die über alle drei Stockwerke verteilt sind. Die genaue Anzahl, Art, Hersteller und Eigenschaften der Sender standen für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Algorithmen werden allgemein gehalten, sodass sie auf diese Information nicht angewiesen sind. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Access Points konstant bleibt, daher reicht eine einmalige Erfassung der Infrastruktur zu Beginn aus. Ein adaptiver Lernansatz ist nicht Teil dieser Arbeit.

In der Testumgebung befinden sich zudem stationäre Bluetooth Hotspots. Da die die Anzahl dieser Sender relativ klein ist und andere mobile Bluetooth Sender mit weniger konstanten Positionen die Ergebnisse beeinflussen können, ist die Anzahl und Position der Bluetooth Hotspots bekannt. Jedoch stehen die Informationen über Art, Hersteller und Eigenschaften der Sender auch hier nicht zur Verfügung.

WLAN und Bluetooth Daten werden mit verschiedenen Sensoren erfasst und lassen sich dementsprechend dem jeweiligen Sensor zuordnen. So lässt sich beispielsweise für eine MAC-Adresse sagen, ob sie zu einem WLAN oder Bluetooth Sender gehört. Über die Konstanz der Signalstärke wird zunächst keine Annahme getroffen. Diese wird im weiteren Verlauf der Arbeit empirisch ermittelt.

### **5.1.3 Smartphones**

Die Sensoren eines Smartphones können unterschiedliche Daten erfassen. Über Funkadapter können Informationen mit anderen Geräten ausgetauscht werden. Um eine genaue Position des Smartphones zu berechnen, sollen Daten von vorhandenen Netzwerken im Gebäude vom Smartphone akquiriert und mit seinen internen Sensoren kombiniert werden.

Für die Studienarbeit stand ein Testgerät zur Verfügung. Dabei handelt es sich um das HTC Desire mit dem Android Betriebssystem in der Version 2.3.7. Das mögliche, unterschiedliche Verhalten von verschiedenen Smartphones wird hier nicht berücksichtigt.

Der WLAN Adapter des Testgeräts kann Daten in relativ kurzen Intervallen von ca. 1 Sekunde empfangen. Wegen Problemen bei schnell aufeinanderfolgenden Bluetooth Aufnahmen werden Bluetooth Daten in einem ein größeren Zeitintervall von ca. 20 – 30 Sekunden aufgenommen.

Die internen Beschleunigungssensor- und Kompassdaten können in sehr hoher Rate abgefragt werden (mehrmals pro Sekunde).

### **5.1.4 Datenbank**

Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit besitzt eine Datenbank. Die Datenbank speichert mit dem Smartphone aufgenommene Daten der Infrastruktur im Testgebäude. Sie ist nach einem Client/Server Modell aufgebaut und kann sowohl auf dem Smartphone als auch auf einen stationären Server abgelegt werden. Das System nutzt die Informationen aus der Datenbank zur Positionsbestimmung.

### 5.1.5 Systeminfrastruktur

Die Systeminfrastruktur des Positionierungssystems besteht aus dem bereits erwähnten HTC Desire Smartphone mit seinen integrierten Sensoren, aus der vorhandenen WLAN und Bluetooth Infrastruktur im Gebäude sowie der Datenbank. Die Verbindung zur Datenbank wird als persistent und fehlerfrei angenommen.

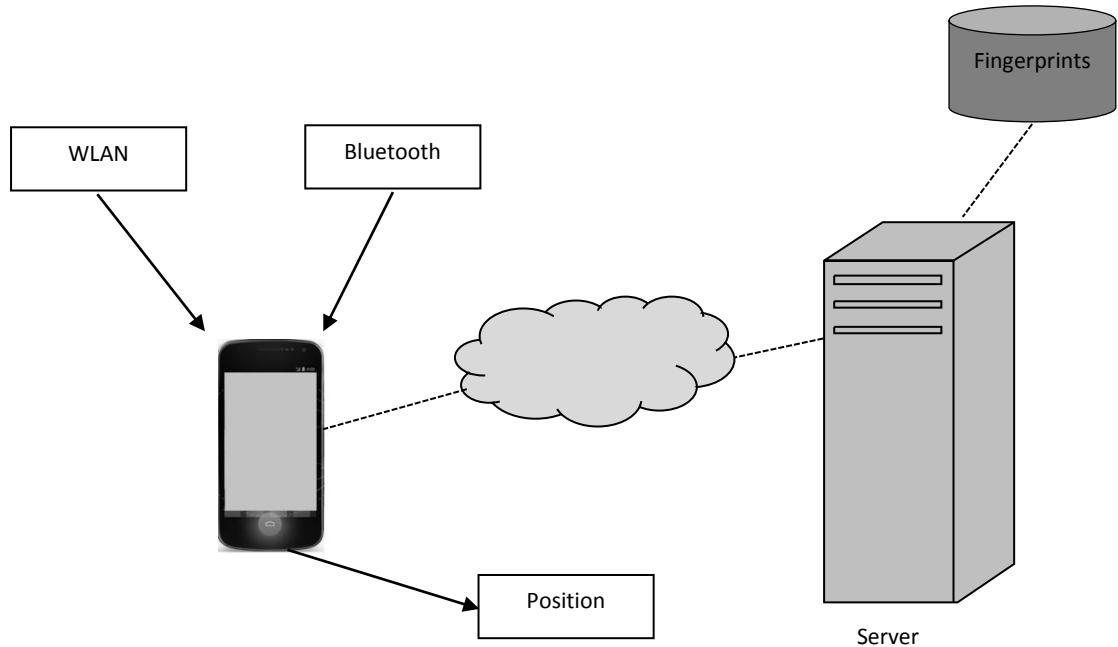


Abbildung 3: Systeminfrastruktur

## 5.2 Konzept

### 5.2.1 Offline-Phase

Die Offline-Phase der Fingerprinting Methode dient zur Sammlung der sogenannten Fingerprints, innerhalb der Umgebung, die in der Online-Phase als Referenz zur genauen Positionsbestimmung herangezogen werden.

Für das hier zu entwickelnde Positionierungssystem soll in der Offline-Phase zuerst eine gewisse Anzahl von Referenzpunkten mit gleichmäßigen Abständen untereinander festgelegt werden. Anschließend soll an jedem dieser Referenzpunkte mit Hilfe des Testgeräts eine Momentaufnahme aller verfügbaren WLAN Sender durchgeführt werden. Die so gewonnenen Adress- und Signalinformationen der Sender werden als Fingerprints in der Datenbank abgelegt, damit sie in der Online-Phase schnell und einfach abrufbar sind. Dazu soll ein Datenbankschema entwickelt werden. Nachfolgend ist das verwendete Schema dargestellt.

Tabelle „Identification“

<u>id</u>	orientation	year	month	day	hour	minute	x_coordinate	y_coordinate
					1			
Tabelle „Wlan“					n			

mac_address	signal_strength	id*
-------------	-----------------	-----

**Abbildung 4: Datenbankschema**

Das Datenbankschema enthält zwei Tabellen. Die erste „Identification“ Tabelle speichert allgemeine Informationen des Fingerprints. In der Spalte „orientation“ soll eine mögliche unterschiedliche Ausrichtung während der Aufnahme festgehalten werden. Die Spalten „year“, „month“, „day“ beinhalten das aktuelle Datum und die Spalten „hour“ und „minute“ die aktuelle Zeit. Ferner dienen die Spalten „x\_coordinate“ und „y\_coordinate“ dazu die Position des Fingerprints zu speichern.

Die „Wlan“ Tabelle enthält alle Adress- und Signalinformationen eines Fingerprints. In die Spalten „mac\_address“ und „signal\_strength“ werden die MAC-Adresse sowie die empfangene Signalstärke von jedem in diesem Fingerprint verfügbaren Sender abgelegt.

Um die Tabellen miteinander in Beziehung zu setzen soll in der ersten „Identification“ Tabelle ein Primärschlüssel eingeführt werden. „id“ wird mit jedem Eintrag in die Tabelle inkrementiert und als Fremdschlüssel „id\*“ für „Wlan“ übernommen. Das bedeutet, dass an jedem neuen Referenzpunkt der Primärschlüssel der „Identification“ Tabelle um eins erhöht und für alle Senderinformationen unverändert in die andere Tabelle übertragen wird. Diese Eigenschaft realisiert eine 1:n Beziehung zwischen der „Identification“ und der „Wlan“ Tabelle. Bluetooth Daten werden erst in der Online-Phase betrachtet (vergleiche Kapitel 5.3.1.1).

### 5.2.2 Online Phase

Die Online-Phase der Fingerprinting Methode bestimmt zu jedem Zeitpunkt die genaue Position des Smartphones innerhalb des Gebäudes. Dazu müssen die Sensoren des Smartphones Informationen der Funkinfrastruktur im Gebäude abfragen. Anschließend können diese in Kombination mit anderen Sensoren und deren Daten zu einer Position ausgewertet werden.

Das hier entwickelte Positionierungssystem nutzt in der online-Phase die Sensoren des Smartphones um alle zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren WLAN und Bluetooth Informationen abzufragen. Die Fingerprinting Methode wird dabei nur mit den WLAN Informationen implementiert (vergleiche Kapitel 5.3.1.1). Das Abfragen der Daten erfolgt in gleichmäßigen Abständen. Danach findet ein Abgleich der WLAN Daten mit der Referenzdatenbank statt. Bei Bluetooth werden lediglich die hohen Werte eines Senders betrachtet. Dabei sind Position und MAC-Adressen dieser Sender bekannt. Für jeden Sensor wird eine wahrscheinlichste eigene Position berechnet werden. Der Beschleunigungssensor des Smartphones führt zu jedem Zeitpunkt eine Schritterkennung durch und der Kompass des Smartphones gibt dieser Bewegung eine Ausrichtung. Damit kann der Schrittzähler auch seine eigene Position berechnen.

Die Vereinigung der Informationen aller Sensoren wird zu einer bestmöglichen Position ausgewertet.

Abbildung 5 zeigt graphisch den Ablauf der Online-Phase.

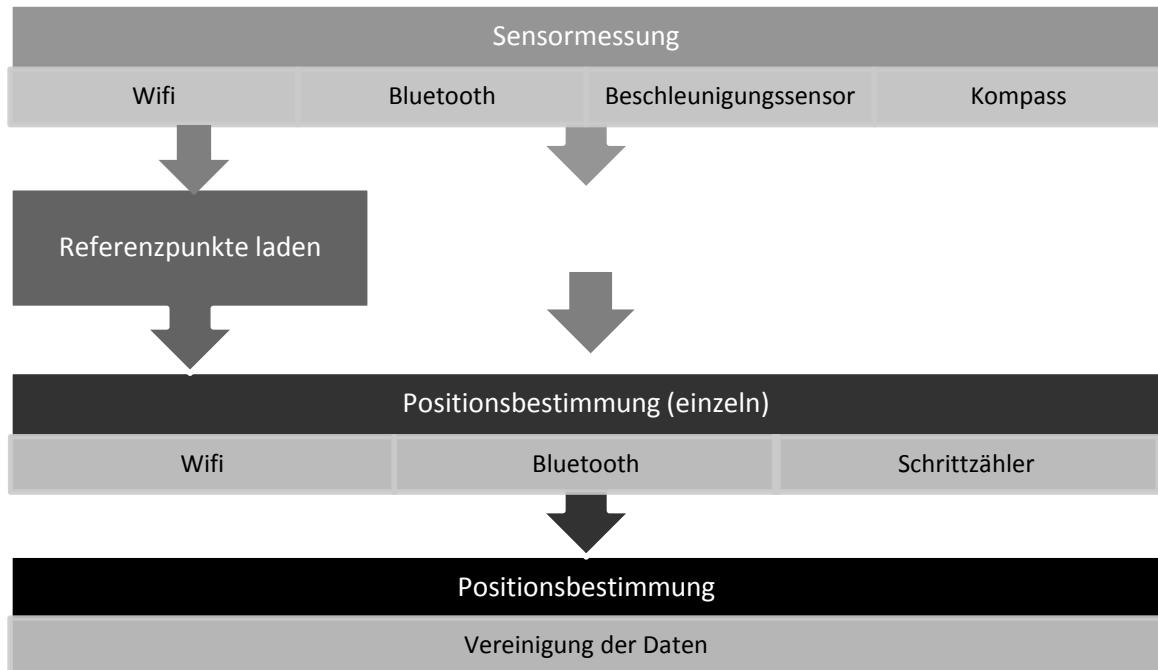


Abbildung 5: Ablauf der online-Phase

#### 5.2.2.1 *Sensormessung*

WLAN und Bluetooth Abfragen finden in entsprechenden Zeitintervallen statt. Die Sensorsteuerung läuft dabei unabhängig voneinander in separaten Threads. Jede Aktualisierung stößt eine neue Berechnung der Position an. Sind aktuelle Daten des Bluetooth Sensors vorhanden, sind diese auch bei der Positionsbestimmung zu berücksichtigen.

Der Beschleunigungssensor des Smartphones führt eine Schritterkennung durch und der Kompass bestimmt die Ausrichtung dieser Schritte. Der Schrittzähler berechnet nicht eigenständig eine neue Position mit Informationen anderer Sensoren, sondern dient als Hilfestellung für die anderen Sensoren.

#### 5.2.2.2 *Referenzpunkte laden*

Nachdem die Sensorwerte für WLAN aktualisiert sind, findet ein Abgleich mit der Datenbank statt. Die Datenbank wird dazu zuerst in den lokalen Cache des Smartphones geladen. Für den Abgleich der Sensordaten werden Adress- und Signalinformationen von allen in der Datenbank gehaltenen Referenzpunkten herangezogen.

#### 5.2.2.3 *Positionsbestimmung (einzeln)*

Die Aktualisierung und der Abgleich der WLAN Sensordaten mit der Referenzdatenbank, eventuelle hohe Signale eines Senders, sowie die Schritterkennung und ihre Ausrichtung führt zur Bestimmung einer Position für jeden einzelnen Sensor. Die Ergebnisse aller Sensoren werden zur Weiterverarbeitung festgehalten.

#### 5.2.2.4 *Positionsbestimmung (Kombination)*

Anhand von Qualitätskriterien werden die Ergebnisse der einzelnen Positionsbestimmungen zu einer bestmöglichen Position zusammengeführt.

### 5.2.3 Visualisierung

Zur Visualisierung wurde für das Positionierungssystem eine Benutzeroberfläche implementiert. Die Offline sowie die Online-Phase rendern das in Abbildung 2 dargestellte Bild auf dem Bildschirm des Smartphones. Das Bild ist verschiebbar und kann in unterschiedlichen Zoomstufen angezeigt werden. Die Offline-Phase bietet zusätzlich die Möglichkeit an, die Position der Aufnahme eines Fingerprints, manuell zu bestimmen. In der Online-Phase ist es wichtig, auf dem gerenderten Bild die berechnete Position anzuzeigen.

## 5.3 Umsetzung

Nachdem in Kapitel 5.2 das Konzept vorgestellt wurde, schildern die folgenden Abschnitte, wie die einzelnen Module umgesetzt werden.

### 5.3.1 Offline-Phase

Die Fingerprinting Methode beruht auf der Annahme, dass am gleichen Ort auch immer der gleiche Fingerprint gemessen werden kann. Wie gut diese Annahme zutrifft wird in diesem Abschnitt untersucht.

#### 5.3.1.1 Reproduzierbarkeit von WLAN Signalen

WLAN Access Points versenden Datenpakete, die Informationen über den Sender beinhalten. Dies ist unter anderem die Mac-Adresse des Senders, wobei die Messung der entsprechenden Signalstärke das Smartphone übernimmt.

##### a) Verhalten der WLAN Signalstärken in einem Messpunkt

In diesem Abschnitt soll zunächst das Verhalten der Signalstärken von WLAN Sendern in einem Punkt untersucht werden. Dafür sind an einer beliebigen Position in der Testumgebung, in gleichen, kurzen zeitlichen Abständen, zehn verschiedene, aufeinanderfolgende Messungen aufgenommen worden. Das Smartphone wurde dabei immer in der Hand gehalten und zwar mit möglichst wenig Abweichung bezüglich der Position, Ausrichtung und Neigung zwischen den verschiedenen Aufnahmen.

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Signalstärken über die zehn verschiedenen Messungen in einem Punkt. Jede Farbe bzw. die unterschiedlichen Punktarten stellen einen anderen Sender und seine Signalstärke dar.

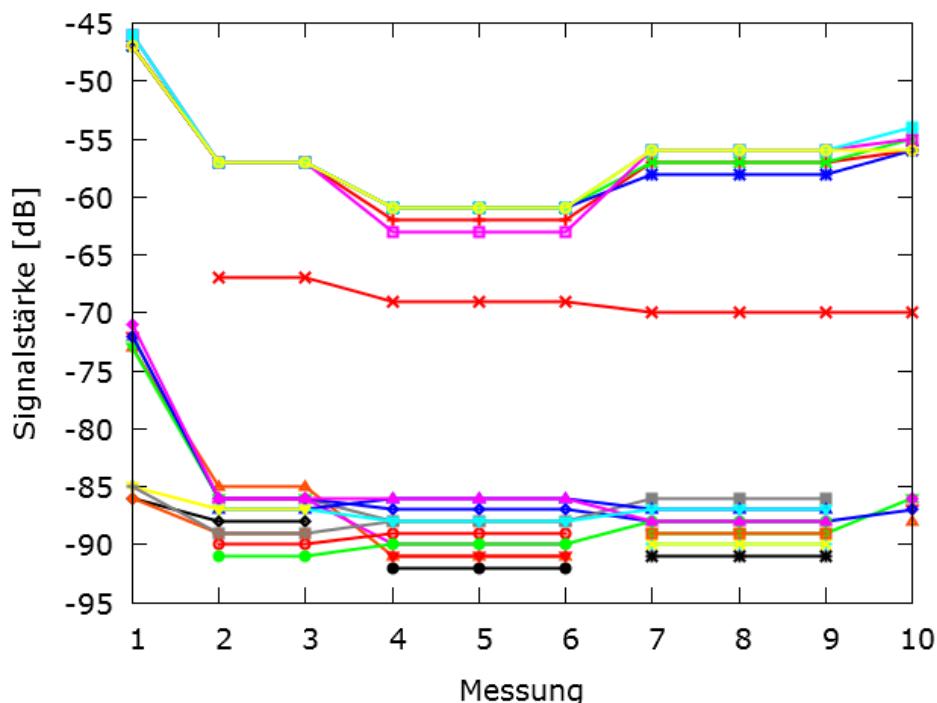


Abbildung 6: WLAN Signalstärken in einem Punkt

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt, dass die Signalstärken eines Senders über die Zeit nicht immer konstant bleiben. Sie weisen bestimmte Schwankungen auf die sich nur schwer dem Sender oder Empfänger zuordnen lassen. Damit Ausreißer wie in Messung 1 zu keiner Verfälschung von Ergebnissen führen sollten bezüglich eines Punktes immer mehrere Aufnahmen berücksichtigt werden. Durch Bildung von Mittelwert oder Median werden Ausreißer kompensiert. Ferner wird das Verschwinden von Sendern für eine Messung behoben.

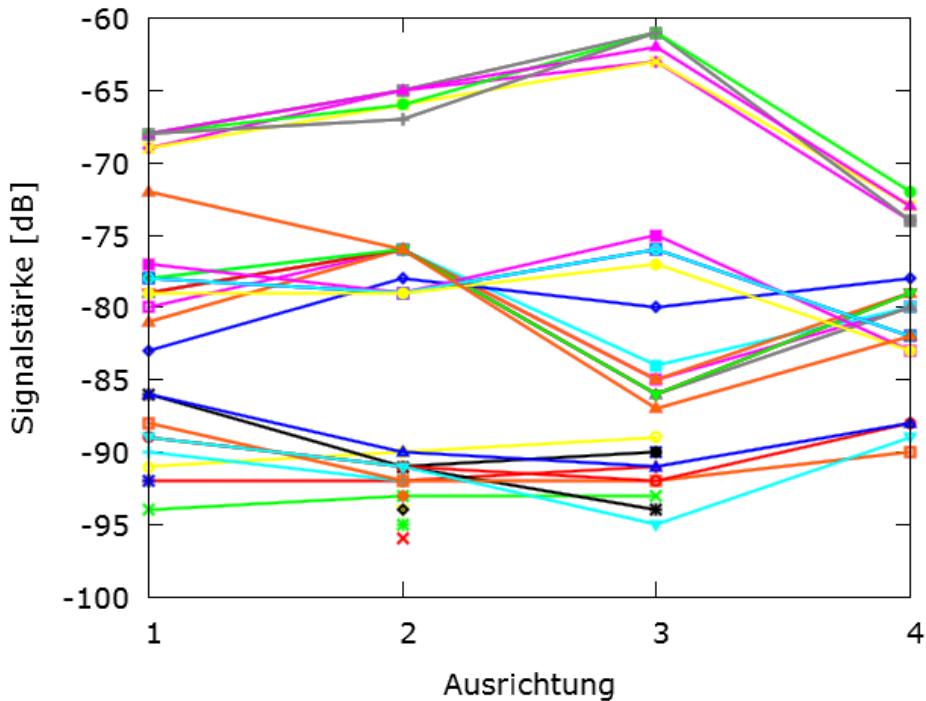
In diesem Positionierungssystem findet in einem zeitlichen Intervall von sechs Sekunden und in einem Abstand von zwei Sekunden jeweils eine Aufnahme aller Signalwerte statt. Aus diesen drei aufgenommenen Signalstärken wird für jeden einzelnen Sender ein Mittelwert gebildet, der dann zusammen mit der MAC-Adresse in die Datenbank gespeichert wird. Der Mittelwert bezieht sich dabei immer auf die Anzahl der aufgenommenen Signalstärken für jeden Sender und nicht auf die drei Messungen.

***b) Verhalten der WLAN Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung in einem Messpunkt***

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass Signalstärken eines WLAN Senders schon in einem Punkt, ohne nennenswerte Veränderung der Position, variieren können. Deshalb wird hier untersucht ob die Ausrichtung des Smartphones zusätzliche Einflüsse auf die Signalstärke und damit die Reproduzierbarkeit von Fingerprints haben.

Zur Untersuchung der Ausrichtung und ihrer Auswirkung auf die WLAN Signalstärken bei einer Änderung, wurde an einer beliebigen Position in der Testumgebung mit dem Smartphone, jeweils eine Aufnahme in vier unterschiedliche Himmelsrichtungen getätigt. Die Ausrichtungen sind  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$ .

In der Abbildung 7 sind die vier Ausrichtungen sowie die entsprechenden Signalstärken des jeweiligen Senders in diesem Punkt abgebildet. Jede Farbe bzw. die unterschiedlichen Punktarten stehen wieder für einen Sender.



**Abbildung 7: WLAN Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung**

Aus der Abbildung 7 kann man erkennen, dass die Änderung der Ausrichtung eine erhebliche Auswirkung auf die Signalstärken hat. Vor allem Signalstärken im oberen und mittleren Segment, scheinen auf diese Veränderungen besonders zu reagieren. Daher sollten die verschiedenen Ausrichtungen in einem Positionierungssystem auch nicht ignoriert werden.

Um die Ausrichtung bei der Aufnahme von Fingerprints zu berücksichtigen, nimmt das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit für jeden Referenzpunkt alle Adress- und Signalinformationen in den vier Himmelsrichtungen auf. Die Werte der unterschiedlichen Ausrichtungen werden unverändert in die Datenbank abgelegt. Für jeden Fingerprint wird in einer Spalte der Datenbank die Ausrichtung dieser Aufnahme angegeben (vergleiche Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.3.1.3). Der Sensor misst die Signalstärke nicht höher als sie ist, wohl aber niedriger (z. B. durch Dämpfung des Körpers). Das bedeutet der beste Wert entspricht am ehesten der tatsächlichen Stärke. Damit wird in der Online-Phase eine Vereinigung der vier Richtungen durchgeführt (vergleiche Kapitel 5.3.2.2)

### **c) Verhalten der WLAN Signalstärken mit der Entfernung zu einem Punkt**

Die Fingerprinting Methode in dem hier entwickelten Positionierungssystem betrachtet als Fingerprints die MAC-Adressen und ihre Signalstärken in einer Umgebung. Damit stellt sich natürlich die Frage ob die Information über hohe bzw. niedrige Signalstärken eines Senders alleine genügend Aussagekraft für die Bestimmung der Position besitzt. Um das Verhalten der Signalstärken mit der Entfernung zu einem Referenzpunkt zu untersuchen, soll ein beliebiger Punkt der Testumgebung als Referenzpunkt gewählt werden. Der Referenzpunkt wurde wie oben beschrieben in alle vier Richtungen aufgenommen und vereinigt.

Die anderen Punkte wurden ausgehend vom Referenzpunkt in eine Richtung und Abständen von ca. 3,6 Meter aufgenommen. Damit ist ein ganzer Korridor der Testumgebung abgedeckt.

In Abbildung 8 ist die Veränderung der Signalstärken mit der Entfernung zu einem beliebigen Referenzpunkt abgebildet. Der erste Messpunkt stellt den Referenzpunkt selbst dar.

Wie bei den vorherigen Diagrammen stehen auch hier die verschiedenen Farben bzw. Punktarten für verschiedene Sender und ihre jeweiligen Signalinformationen.

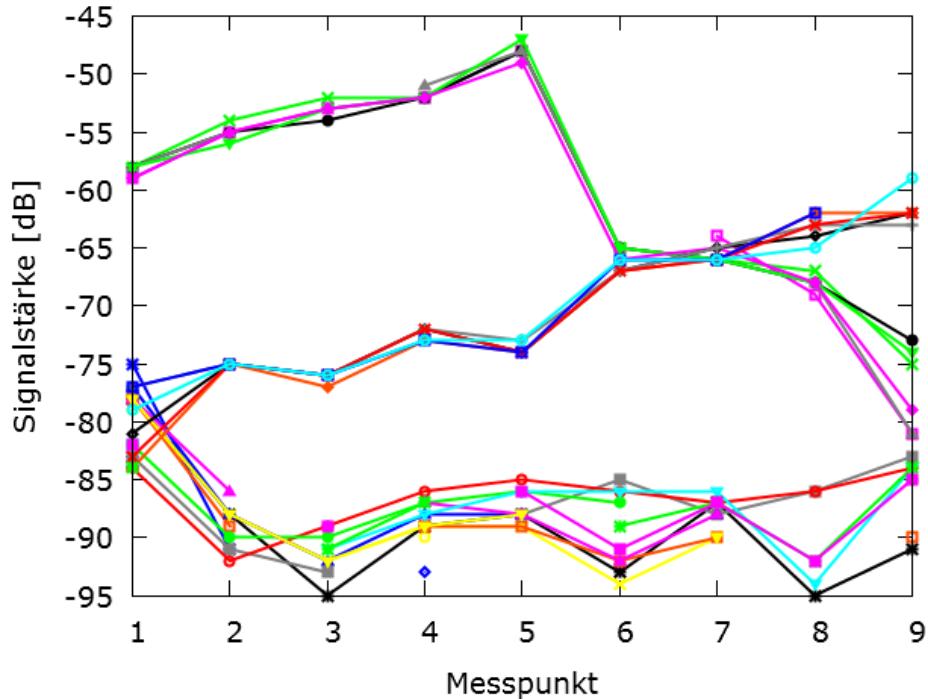


Abbildung 8: WLAN Signalstärken in Abhängigkeit der Entfernung zu einem Punkt

Abbildung 8 verdeutlicht, dass sich die einzelnen Signalstärken mit der Entfernung zum Referenzpunkt unterschiedlich verhalten. Betrachtet man den Verlauf zwischen den ersten fünf Messpunkten, sieht man, dass im oberen Teil der Abbildung die Messwerte einiger Sender ansteigen und erst dann abfallen. Im unteren Bereich ist das Gegenteil der Fall, hier fallen die Signalwerte zuerst etwas ab und steigen dann minimal an. Während die hohen Stärken monoton ansteigen bzw. abfallen, besitzen die Sender mit den niedrigen Signalstärken meistens keinen monotonen Verlauf. Daraus kann geschlossen werden, dass die hohen Signalstärken eine höhere Aussagekraft besitzen als die niedrigen.

Ferner ist aus dem Diagramm in Abbildung 8 zu erkennen, dass einige Sender nicht über alle Messpunkte sichtbar sind sondern entweder bei einem Punkt neu dazukommen oder ihre Informationen ab einem Punkt nicht mehr empfangen werden.

Da die Fingerprinting Methode davon ausgeht, dass die Position und Anzahl der Sender unbekannt sind, haben die oben gewonnenen Informationen nur einen relativen Nutzen für dieses Positionierungssystem. Die Position der WLAN Access Points ist konstant deshalb, kann aus dem Diagramm entnommen werden, dass sich die Signalstärken mit der Entfernung zum Sender irgendwie ändern. Allerdings ist es nicht möglich allein aus diesen Informationen die Position des Smartphones zu berechnen, ohne dass dabei die Positionen der Access Points bekannt sind.

#### ***d) Fazit***

Die Offline-Phase speichert MAC-Adressen und die entsprechenden Signalstärken der WLAN Sender als Referenzpunkte bzw. Fingerprints in die Referenzdatenbank. Dabei wird als Signalwert eines Senders der Mittelwert über drei Messungen in der Datenbank abgelegt.

Die Ausrichtung während der Aufnahme eines Fingerprint spielt für Signalstärken auch eine Rolle. Die Signalwerte über vier Himmelsrichtungen werden für jeden Referenzpunkt in die Datenbank übernommen.

##### ***5.3.1.2 Reproduzierbarkeit von Bluetooth Signalen***

Genauso wie WLAN senden Bluetooth Hotspots Datenpakete, die alle sich im Empfangsbereich befindenden und mit Bluetooth Sensoren ausgestatteten Geräte empfangen können. Diese Datenpakete werden auch als „Beacons“ bezeichnet. Sie enthalten Informationen wie MAC-Adresse und den Namen ihres Senders.

Das in dieser Studienarbeit entwickelte Positionierungssystem, nutzt als Fingerprints MAC-Adressen und die vom Smartphone gemessenen Signalstärken der Sender. Die Berechnung der Position basiert auf einem Vergleich der aktuellen Daten mit den Fingerprints in der Datenbank. Um die Eignung von Bluetooth für diese Art von Positionsbestimmungen festzustellen, soll wie im vorherigen Abschnitt für WLAN, die Reproduzierbarkeit der Bluetooth Signale untersucht werden. Die Zahl der stationären Sender in der Testumgebung ist relativ klein. Andere mobile Geräte wie Notebooks oder Mobiltelefone die auch mit Bluetooth Sensoren ausgestattet sind, können die Ergebnisse beeinflussen. Somit werden in allen durchgeführten Messungen nur die MAC-Adressen und Signalstärken der stationären Bluetooth Sender betrachtet.

##### ***a) Verhalten der Bluetooth Signalstärken in einem Messpunkt***

Bereits bei der Untersuchung von WLAN Signalstärken wurde festgestellt, dass die Aufnahmen in einem Punkt in der gleichen Position, Neigung und Ausrichtung des Mobiltelefons durchaus variieren können. Das Szenario soll für die Bluetooth Sender wiederholt werden.

An einem beliebigen Punkt der Testumgebung wurden in gleichen Zeitabständen zehn aufeinanderfolgende Messungen mit dem Smartphone durchgeführt. In Abbildung 9 ist der Verlauf der Signalstärken über diese zehn Messungen abgebildet.

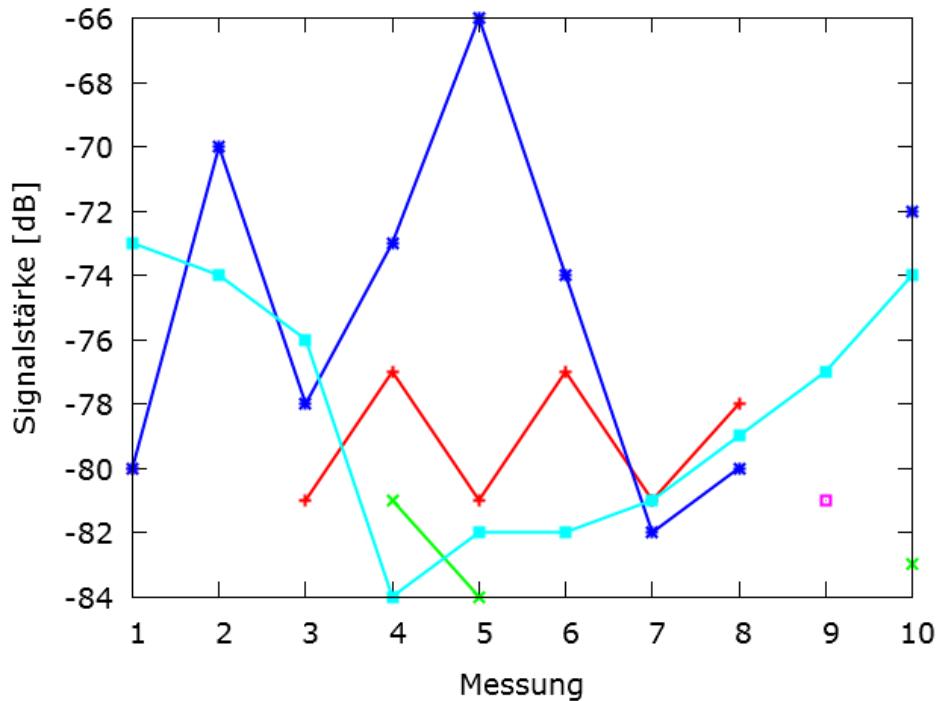


Abbildung 9: Bluetooth Signalstärken in einem Punkt

Im Gegensatz zum WLAN verhalten sich die Bluetooth Signalstärken extrem unstabil. Sie weisen relativ hohe Sprünge zwischen den einzelnen Messungen auf. Ein Extrem stellt die dunkelblaue Kurve in Abbildung 9 dar. In Messung 5, hat sie eine sehr hohe Signalstärke, in Messung 7 zeigt sie wiederum eine sehr niedrige Signalstärke und in Messung 9 ist sie überhaupt nicht sichtbar. Die Sprünge können sowohl durch den Sender selbst, als auch den Empfänger verursacht worden sein. Externe Ursachen wie Dämpfung oder Störgeräte im gleichen Frequenzbereich können ferner der Grund sein, warum keine weitgehend konstanten Funktionen entstanden sind. Die Sender mit niedrigen Signalstärken sind wie bei WLAN, sehr instabil. Ihre Sichtbarkeit ist nicht immer gewährleistet, was in der Abbildung 9 durch den grünen und roten Signalstärkenverlauf gezeigt wird.

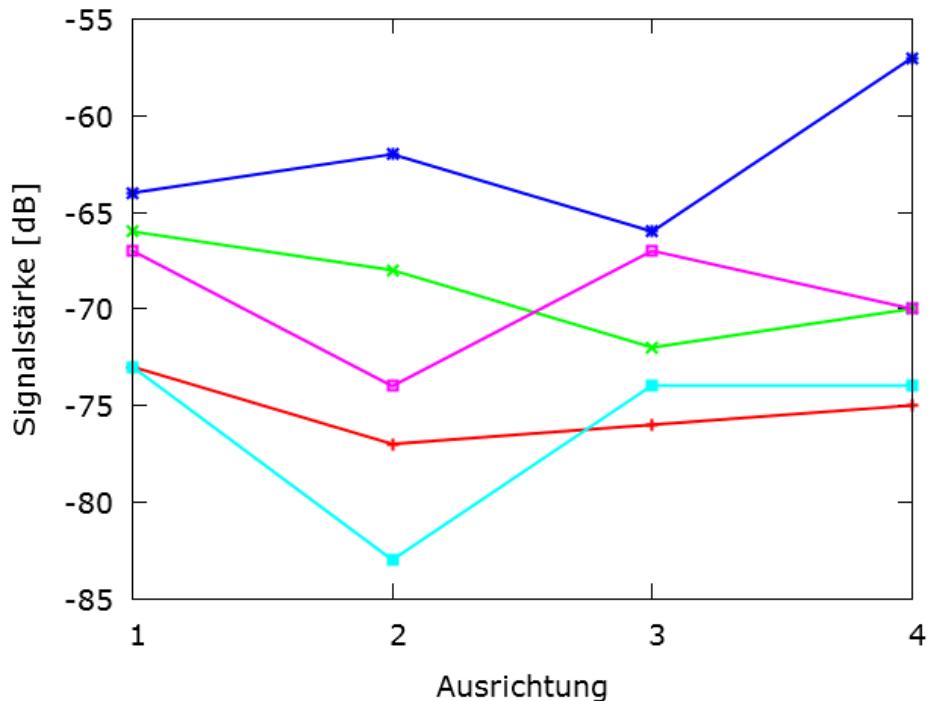
Der Ansatz der Positionsbestimmung durch Berechnung der Euklidischen Distanz kann mit den fehlerbehafteten Sensorwerten des Bluetooth Sensors nicht verfolgt werden. Da es sich nicht um einzelne Ausreißer handelt, wie sie bei WLAN festgestellt wurden, bringt die Mittelwertbildung hier nicht den gewünschten Effekt. Eine Idee ist, die Sichtbarkeit der Sender zur Einschränkung oder Ausschließung gewisser Positionen zu nutzen. Wie Bluetooth Informationen zur Verbesserung der WLAN Fingerprinting Methode genutzt werden können, zeigen die nächsten Untersuchungen.

### **b) Verhalten der Bluetooth Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung in einem Messpunkt**

Unabhängig der im letzten Abschnitt gezeigten schlechten Bluetooth Sensorwerte, soll hier nochmal auf das Verhalten der Bluetooth Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung eingegangen werden.

Für die Untersuchung der Signalstärken bei unterschiedlichen Himmelrichtungen werden an einer Position in der Testumgebung mit dem Smartphone die Adress- und Signalinformationen der Bluetooth Sender aufgenommen.

Wieder werden vier verschiedene Himmelsrichtungen betrachtet und zwar  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$ . Abbildung 10 zeigt die Signalstärken bei den unterschiedlichen Ausrichtungen.



**Abbildung 10: Bluetooth Signalstärken bei Änderung der Ausrichtung**

Abbildung 10 zeigt die Änderungen die entstehen können wenn sich die Ausrichtung einer Aufnahme in einem Punkt verändert. Der Verlauf der Signalstärken über die vier verschiedenen Ausrichtungen ist nicht konstant.

Im weiteren Verlauf der Arbeit liegt der Fokus darauf, ein Maß zu finden mit welchem der Bluetooth Sensor als Positionierungsquelle herangezogen werden kann.

### c) Verhalten der Bluetooth Signalstärken mit der Entfernung zu einem Punkt

Es ist noch wichtig zu sehen wie sich die Bluetooth Signalstärken ändern wenn von einem Punkt ausgehend in regelmäßigen Abständen gemessen wird. Als Referenzpunkt wird ein beliebiger Punkt in der Testumgebung gewählt. In Abständen von 3,6 Meter wurden in eine Richtung acht Messungen durchgeführt. In Abbildung 11 ist der Verlauf der empfangenen Bluetooth Signalstärken abgebildet.

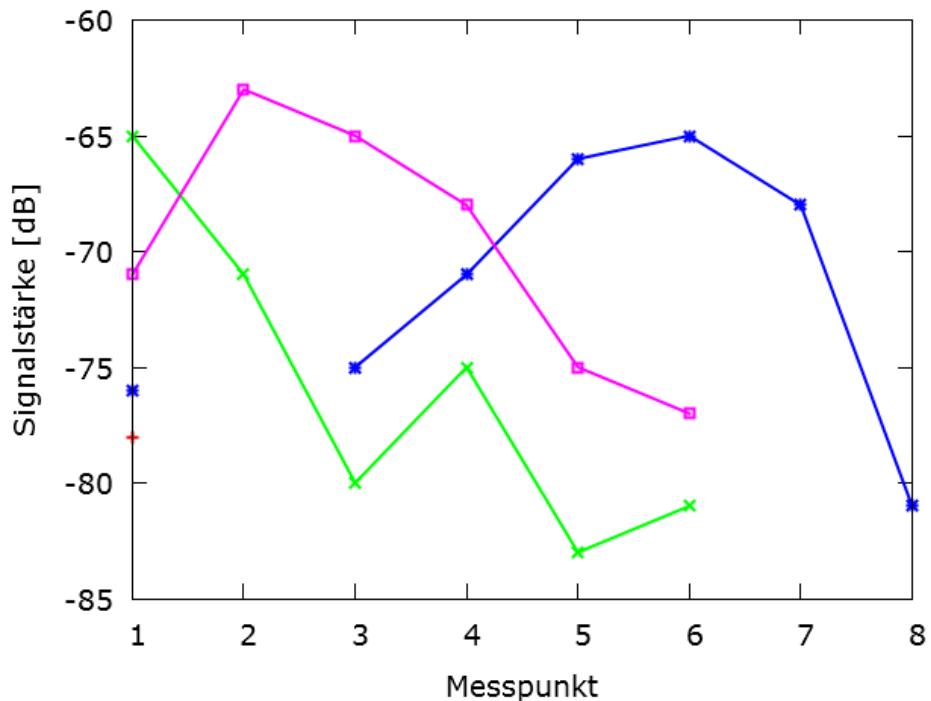


Abbildung 11: Bluetooth Signalstärken in Abhängigkeit der Entfernung zu einem Punkt

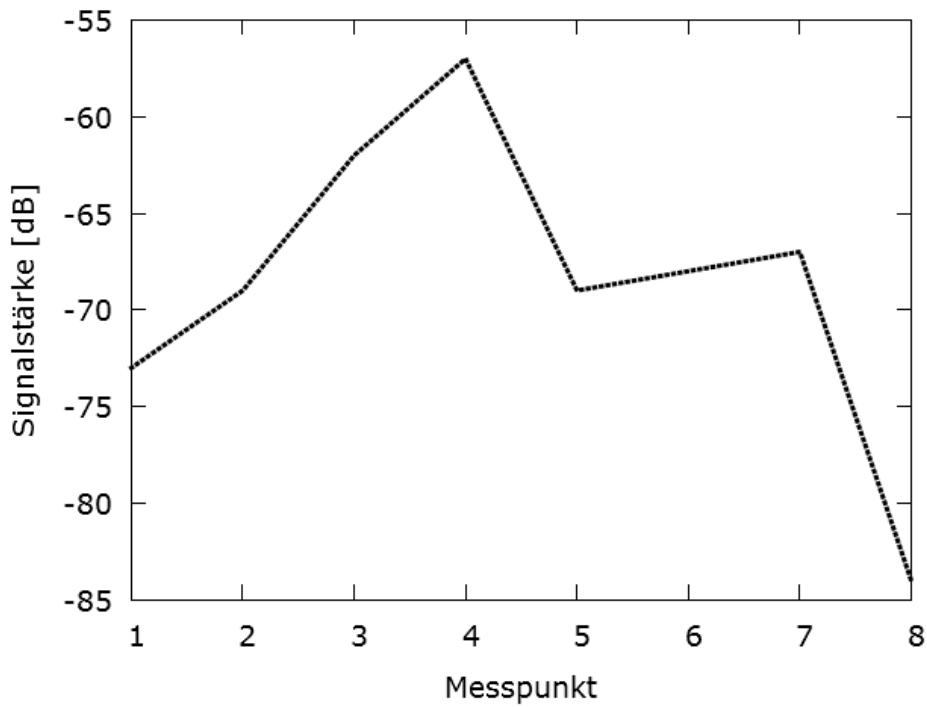
Der erste Messpunkt entspricht dem Referenzpunkt selbst. Referenzpunkte werden nach dem im Kapitel 5.3.1.1 über WLAN Ausrichtungen beschriebenen Verfahren vereinigt. Das Bild zeigt vier unterschiedliche Bluetooth Sender wobei ein Sender lediglich im Referenzpunkt sichtbar ist. Die andern drei besitzen ein eindeutiges Maximum und weisen bis auf die Sprünge der grünen Linie im Messpunkt vier und sechs glatte Funktionen auf.

Idealerweise bilden die drei Funktionen aus Abbildung 11 drei unterschiedliche, in verschiedenen Büros positionierte Bluetooth Sender ab. Damit kann gesagt werden, dass in unmittelbarer Nähe des Referenzpunktes ein Sender stationiert ist, was die hohe Signalstärke der grünen Linie in diesem Punkt erklärt. Bewegt man sich zum nächsten Messpunkt in 3,6 Meter Entfernung, befindet man sich in der Nähe des nächsten Bluetooth Senders, der das Maximum der lila abgebildeten Funktion darstellt. Vier Punkte weiter befindet man sich schließlich beim nächsten Sender.

Mit den eben beschriebenen Beobachtungen wäre es möglich, anstelle einer Euklidischen Distanz mit schwankenden und öfters abbrechenden Bluetooth Signalstärken, die Stellen mit hoher Signalstärke dem Sender zuzuordnen. Dieser Ansatz wird weiter unten verfolgt. Zuerst wird jedoch die Sichtbarkeit eines Senders näher untersucht.

#### **d) Sichtbarkeit der Bluetooth Sender**

Bereits aus der Abbildung 11 wird deutlich, dass die Betrachtung der Sichtbarkeit eines Bluetooth Senders alleine nicht ausreicht, um sich genau positionieren zu können. Ein Bluetooth Sender kann durchaus über lange Strecken sichtbar sein. Abbildung 12 soll dies nochmal verdeutlichen. Die Signalstärken der Bluetooth Sender wurden über den ganzen oberen Korridor in der Testumgebung gemessen. Alle Punkte sind in Abständen von 3,6 Meter und in eine Richtung aufgenommen worden. Abbildung 12 zeigt einen Bluetooth Sender, der über den ganzen Korridor sichtbar ist. In diesem Korridor waren noch weitere Bluetooth Sender vorhanden, wurden aber wegen ihrer Sichtbarkeit nur über einzelne Teile des Korridors außer Acht gelassen.

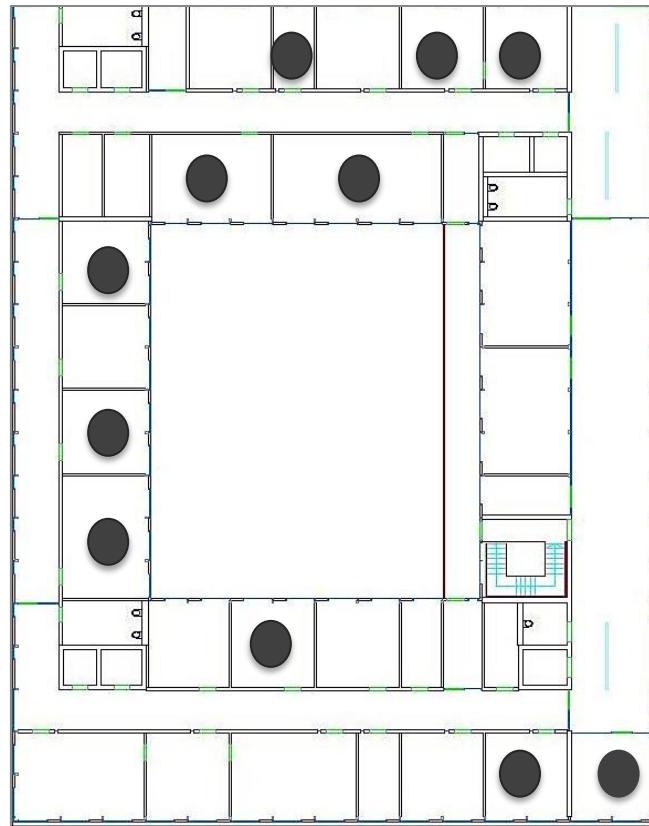


**Abbildung 12: Bluetooth Sender und seine Sichtbarkeit über einen Korridor**

Falls nur die Sichtbarkeit ohne Betrachtung der Signalstärke ein Kriterium für die Positionierung wäre, könnte beispielweise mit der Information dieses Senders nur eine Einschränkung der Position auf knapp 30 Meter stattfinden. Dies ist für eine Positionierung in Gebäuden kein akzeptabler Wert. Die Lage des Maximums dagegen ist eindeutig und lässt sich gut von anderen Stellen im Gebäude unterscheiden.

#### **e) Verhalten der Bluetooth Signalstärken in der Nähe ihres Senders**

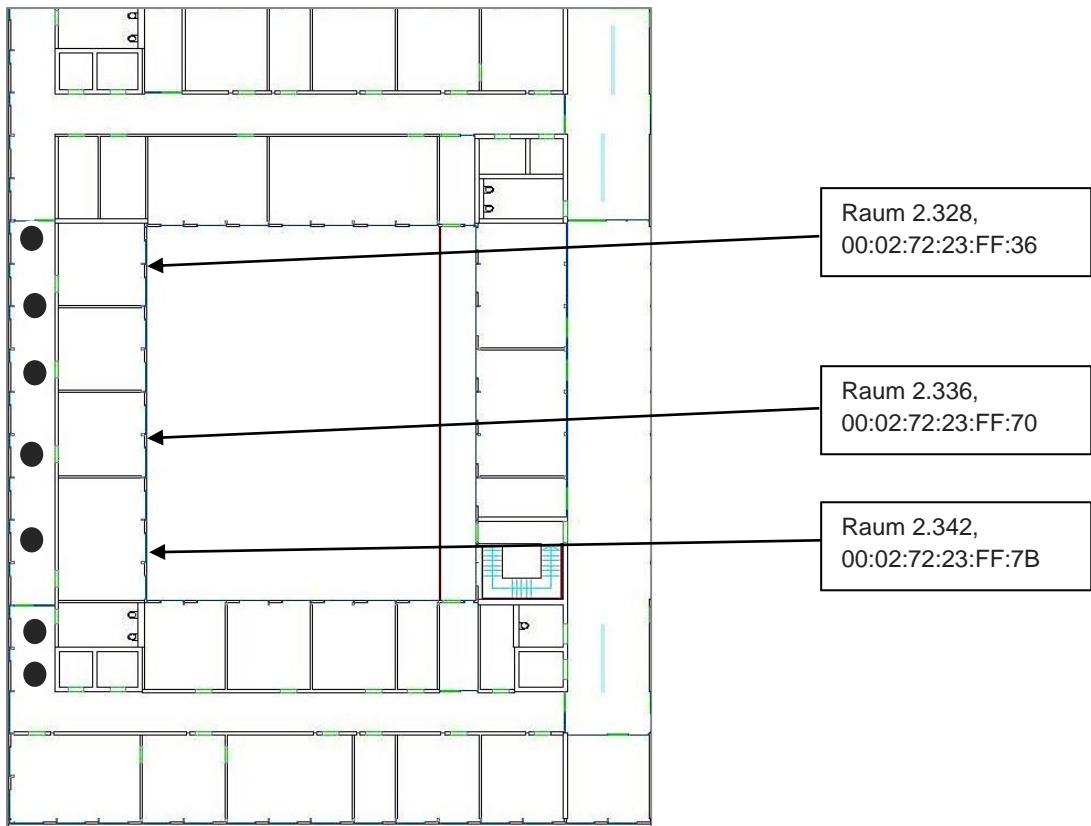
Zur Untersuchung eines Bluetooth Signalwertes in der Nähe seines Senders werden die genauen Positionen dieser Sender benötigt. Die Positionen sind durch schwarze Punkte in Abbildung 13 dargestellt. Die bereits bekannten MAC-Adressen können den einzelnen Räumen zugeordnet werden.



**Abbildung 13: Bluetooth Sender in der Testumgebung**

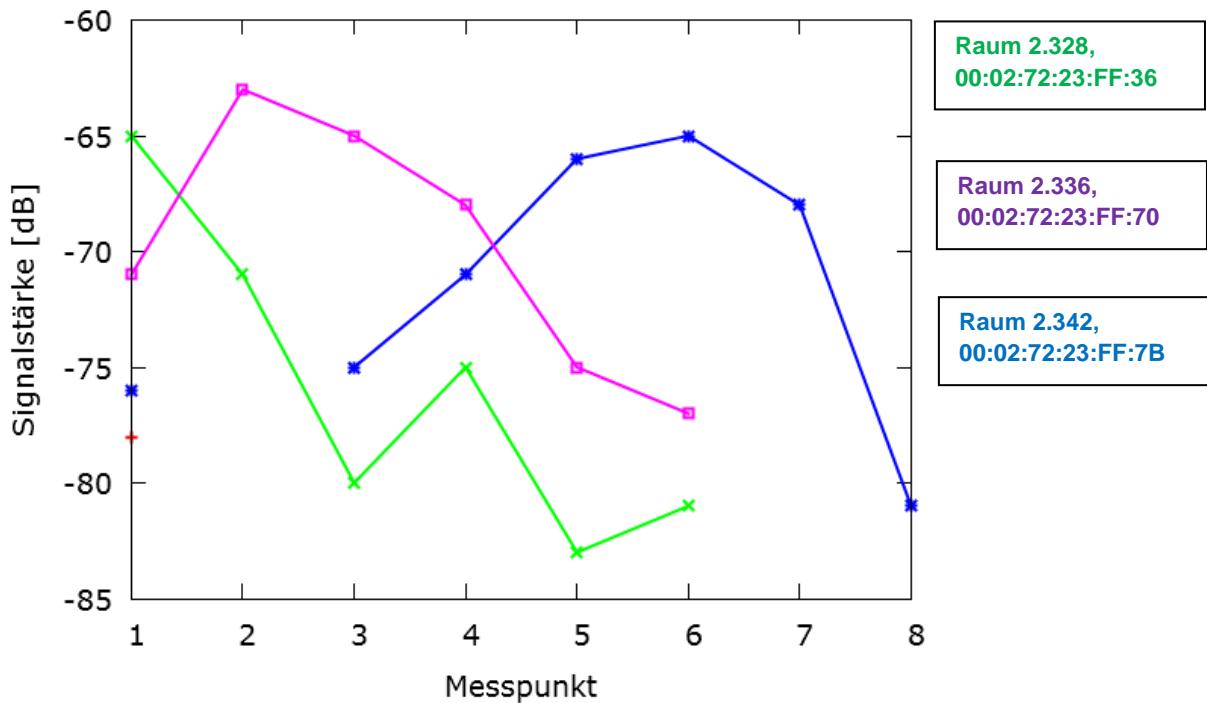
Die Testumgebung besitzt elf verschiedene stationäre Bluetooth Sender die über den ganzen Quadranten verteilt sind. Dies sollte eine gute Abdeckung der Umgebung mit Bluetooth Signalen gewährleisten (vergleiche Kapitel 6.1.1.2).

Um festzustellen, ob an den oben abgebildeten Positionen eine maximale Bluetooth Signalstärke dieses Senders empfangen wird, soll nochmal auf das den Verlauf der Signalwerte und die genaue Position der Aufnahmen in Abbildung 11 eingegangen werden. Dazu werden zunächst die Positionen identifiziert, aus deren Aufnahmewerten die drei Kurven entstanden sind. Abbildung 14 zeigt durch schwarze Punkte die Aufnahmepositionen.



**Abbildung 14: Aufnahme von Bluetooth Daten**

Vergleicht man die Aufnahmepositionen mit der unten nochmal eingefügten Abbildung 11 wird deutlich, dass sich das erste Maximum genau dort befindet, wo der Bluetooth Sender stationiert ist. Das zweite und das dritte Maximum liegen sich auch dort wo sich ein Sender befindet. Die exakte Position der Sender im Raum steht hier nicht zur Verfügung.



### f) Fazit

Bluetooth Daten weisen eine gewisse Unsicherheit bezüglich ihrer Signalstärken auf. Bei mehreren Messungen können die Werte eines Senders sehr unterschiedlich sein. Außerdem sind in einem großen öffentlichen Gebäude mit vielen Büros auch viele andere Mobilgeräte, wie Notebooks, vorhanden, die ebenfalls mit Bluetooth Sendern ausgestattet sind. Für Fingerprinting mit Bluetooth müsste daher immer sichergestellt werden, dass mit zuverlässigen Signalwerten gearbeitet wird, sowie, dass keine falschen Informationen als Fingerprints identifiziert werden. Allerdings konnte experimentell festgestellt werden, dass sich hohe Signalstärken genau der Position des Senders zuordnen lassen, da sie nur genau dort auftreten. Daher werden für das hier entwickelte Positionierungssystem - im Gegensatz zur WLAN Positionierung - alle MAC-Adressen der Bluetooth Sender zusammen mit ihrer Positionen als gegebenes Vorwissen in das System integriert. Dies ist vertretbar, da Bluetooth Sender in den meisten Gebäuden bewusst für solche Zwecke platziert werden. In der Online-Phase wird Bluetooth nur betrachtet, wenn ein Sender mit hoher Signalstärke erfasst wird und damit eine gewisse Genauigkeit gewährleistet ist.

### 5.3.1.3 Datenbank

Das Datenbankschema für WLAN Fingerprinting aus Kapitel 5.2.1 zeigt die Struktur der Referenzdatenbank. Die einzelnen Fingerprints sehen folgendermaßen aus:

#### 1. Tabelle „Identification“

<u>idi</u>	<i>orientation</i>	<i>year</i>	<i>month</i>	<i>day</i>	<i>hour</i>	<i>minute</i>	<i>x_coordinate</i>	<i>y_coordinate</i>
1	1	2012	8	22	2	40	544.217041015625	644.6276245117188
2	2	2012	8	22	2	40	544.217041015625	644.6276245117188
3	3	2012	8	22	2	40	544.217041015625	644.6276245117188
4	4	2012	8	22	2	40	544.217041015625	644.6276245117188

#### 2. Tabelle „WLAN“

<i>mac_address</i>	<i>signal_strength</i>	<u>idw</u>
00:12:43:48:24:92	-88	1
...	...	...
00:1e:79:d5:11:b1	-85	2
...	...	...
00:1e:79:d5:11:b6	-82	3
...	...	...
00:12:43:48:1d:e2	-84	4
...	...	...

Abbildung 15: Beispiel eines Fingerprints

### 5.3.1.4 Visualisierung

Die Visualisierung der offline und online-Phase ist sehr wichtig, da zum einen die Position der Aufnahme eines Fingerprints festgelegt werden muss und zum anderen die berechnete Position angezeigt werden soll.

Mit der Benutzeroberfläche des Positionierungssystems kann zu Beginn entweder eine Referenzdatenbank geladen oder neu generiert werden. Danach kann der Nutzer zwischen den einzelnen Phasen wechseln, wobei die online-Phase erst möglich ist, wenn eine Datenbank geladen oder mindestens ein Referenzpunkt in die neue Datenbank aufgenommen worden ist.

In beiden Phasen rendert das Smartphone das Bild des ganzen zweiten Obergeschosses aus Abbildung 2 auf dem Bildschirm. Das gerenderte Bild hat eine Breite von 1089 Pixeln und eine Höhe von 1285 Pixeln. Es ist mit den Fingern verschiebbar und kann durch einen Schieberegler in drei unterschiedlichen Zoomstufen angezeigt werden.

Die Offline-Phase erfordert die Identifizierung der genauen Positionen eines Fingerprints. Dazu wird in dieser Phase ein verschiebbarer Punkt im Bild der Testumgebung angezeigt. Dieser Punkt kann durch Berührung auf die Position einer Aufnahme im Bild verschoben werden. Die x und y Pixelkoordinaten einer Position werden zusammen mit den anderen Informationen für jeden Referenzpunkt in die Datenbank abgelegt.

### 5.3.2 Online-Phase

Die Online-Phase der Fingerprinting Methode vergleicht die aktuellen Daten der Infrastruktur mit den Daten in der Referenzdatenbank. Aus diesem Vergleich und möglicher Kombination mit anderen Informationen wird eine Position des Smartphones und seines Nutzers im Gebäude berechnet.

Dieses Kapitel thematisiert zunächst die Umsetzung der Positionsbestimmung mit WLAN, Bluetooth, sowie Beschleunigungssensor und Kompass im Einzelnen. Anschließend wird die Kombination dieser Informationen und die Auswertung dieser zu einer Position behandelt.

#### 5.3.2.1 Sensormessung

##### 1. WLAN

Damit bestimmt werden kann, wie oft eine neue Berechnung der Position stattfinden soll, wird die Sensormessung der WLAN Informationen im Gebäude von dem Positionierungssystems selbst initiiert. In einem Abstand von 3 Sekunden werden die aktuellen Daten des WLAN Sensor des Smartphones abgefragt. Alle Adress- und Signalinformationen werden anschließend mit den Referenzpunkten aus der Datenbank verglichen. Durch den Abgleich der gemessenen mit den gespeicherten Fingerprints wird die aktuelle Position des Smartphones bestimmt (vergleiche Kapitel 5.2.2.3).

##### 2. Bluetooth

Auf die Schwächen von Bluetooth im Zusammenhang mit der Fingerprinting Methode und auf die Algorithmen die auf der Signalstärke der Sender arbeiten, wurde bereits im Kapitel 5.3.1.2 eingegangen. Ferner soll das Positionierungssystem so oft wie möglich Informationen vom Bluetooth Sensor des Smartphones abfragen.

Die ersten Tests in der Online-Phase zeigten, dass der Sensor nur in einem Zeitintervall von etwa zwanzig bis dreißig Sekunden neue Daten messen kann. Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit wird alle 25 Sekunden eine neue Anfrage an den Bluetooth Sensor des Smartphones generieren. Von den akquirierten Daten werden anschließend die Signalstärken, die über einem Schwellwert liegen, für die Bestimmung der Position verantwortlich sein.

##### 3. Kompass und Beschleunigungssensor

Mit dem internen Beschleunigungssensor des Smartphones soll eine Schritterkennung seines Nutzers durchgeführt werden. Der Kompass ordnet diesen Schritten eine Ausrichtung in der Umgebung zu. Daher wird hier zuerst einmal die Funktionsweise der beiden Komponenten erläutert.

Für die Erkennung der Schritte, ihre Ausrichtung und Positionsberechnung sind zwei Sensoren des Smartphones zuständig: der Beschleunigungssensor sowie der Magnetfeldsensor der über eine Kompass API ausgewertet werden kann.

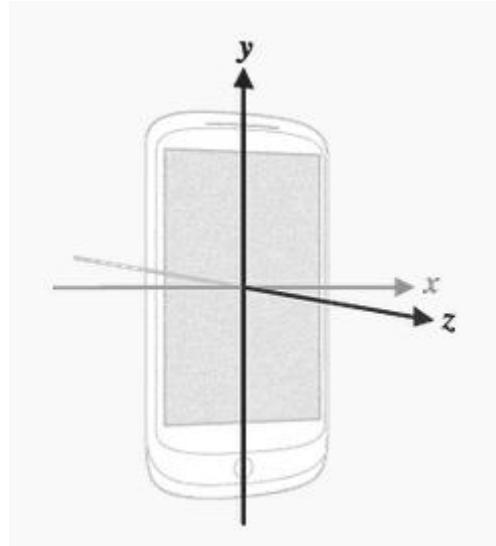
Beschleunigung des Smartphones wird als Kraft gemessen, die auf den Sensor einwirkt [14]. Da die Beschleunigung durch die Kraft der Gravitation beeinflusst wird, ist in jeder Messung der Beschleunigung auch die Gravitation miteinbezogen. Wird das Smartphone nicht bewegt, erfährt es trotzdem eine Beschleunigung, die exakt der Gravitation entspricht:

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Somit lautet die Formel für die Berechnung der bereinigten Beschleunigung:

$$a = -g - \sum \frac{F}{m}$$

Der Beschleunigungssensor nutzt das in Abbildung 16 dargestellte Koordinatensystem. Die x-Achse liegt horizontal und zeigt nach rechts, die y-Achse liegt vertikal und zeigt nach oben. Die z Achse zeigt nach vorne aus der Bildschirmebene heraus. Der Koordinatenursprung wird als Mittelpunkt des Smartphones definiert. Andere Sensoren, wie zum Beispiel der Magnetfeldsensor, nutzen das gleiche Koordinatensystem.



**Abbildung 16: Koordinatensystem für Beschleunigungs- und Magnetfeldsensor des Smartphones [14]**

Der Beschleunigungssensor zeigt positive Beschleunigungen entlang der Achsenausrichtungen. Eine Beschleunigung entlang der x-Achse tritt im Porträtsmodus (aufrechtgeholtne Gerät) bei einer gradlinigen Vorwärtsbewegung nicht auf. Drehungen werden schon durch den Kompass erfasst.

Für das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit werden nur die y- und z-Achse für die Beschleunigung betrachtet. Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen gemessene Beschleunigungswerte der x-, y-, und z-Achse für ein Bewegungsprofil bestehend aus vier Schritten, gefolgt von einer kurzen Pause und weiteren vier Schritten.

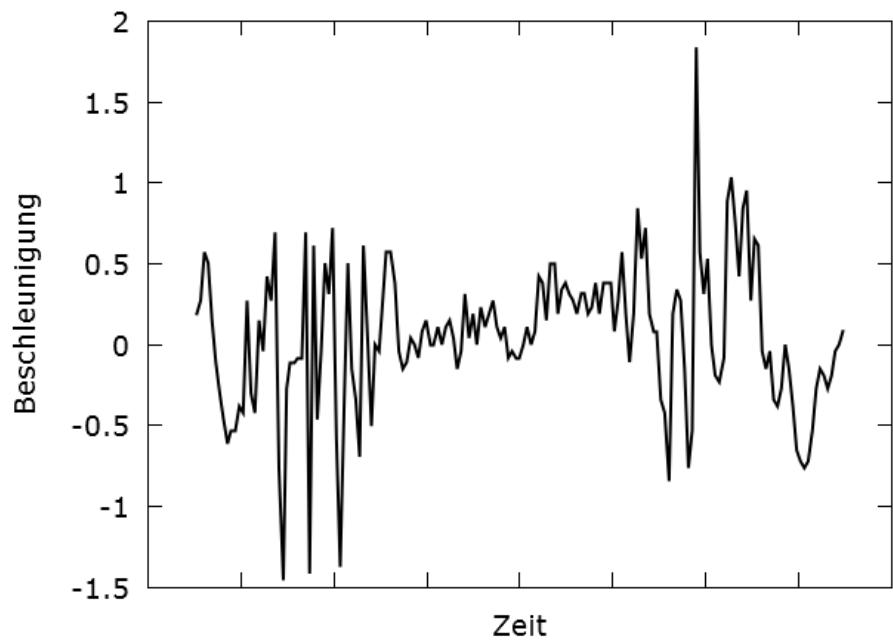


Abbildung 17: Beschleunigung entlang der x-Achse

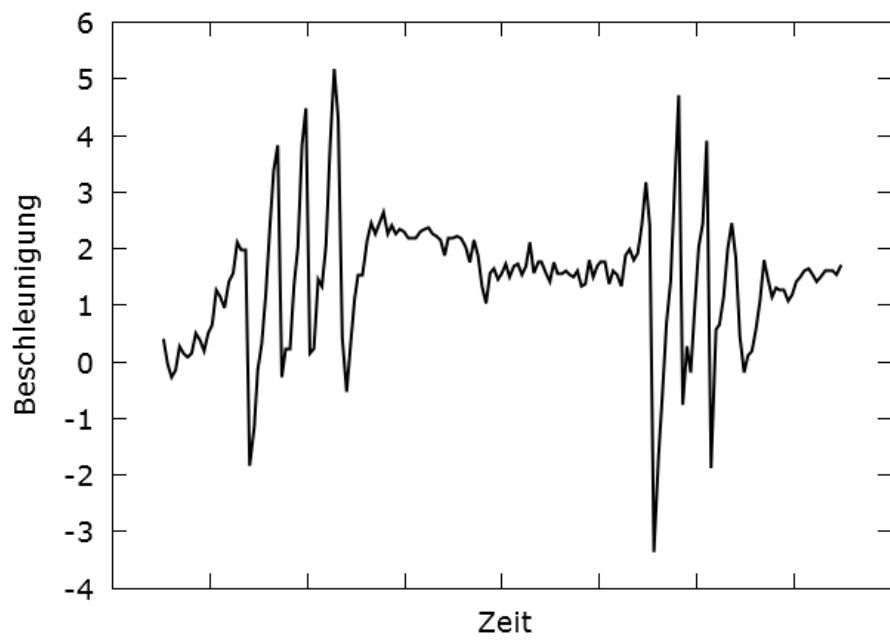


Abbildung 18: Beschleunigung entlang der y-Achse

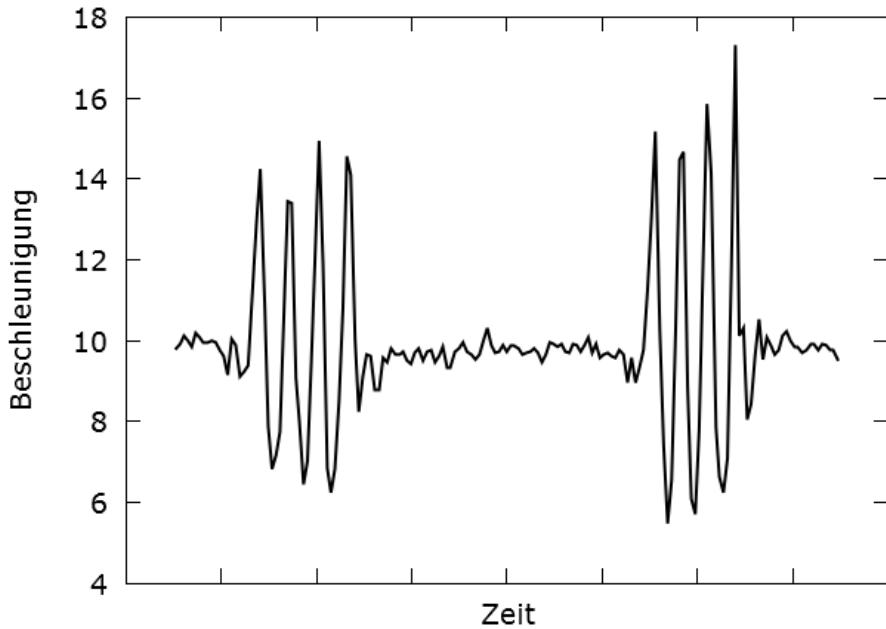


Abbildung 19: Beschleunigung entlang der z-Achse

In den Diagrammen der y- und z-Achse lassen sich die Schritte deutlich von der Ruhepause unterscheiden.

Die Beschleunigungen entlang der y- und z-Achse zeigen die vier Schritte, die Pause sowie die weiteren vier Schritte durch einen steilen Anstieg bzw. Fall deutlich. Ein Schritt besteht dabei aus einer kurzen positiven Beschleunigung (Abstoßen mit hinterem Fuß), gefolgt von einer ähnlich großen entgegengesetzten Beschleunigung (Aufreten mit vorderem Fuß). Je nach Lage des Smartphones (horizontal/vertikal bezüglich Fußboden) ist dieses Profil stärker in der y- oder z-Achse zu sehen, weshalb für die lageunabhängige Schritterkennung die Beschleunigungen beider Achsen addiert werden. Die Schwankungen in x-Richtung folgen aus leichten seitlichen Armbewegungen, die für die Schritterkennung nicht von Bedeutung sind. Das Verfahren zur Schritterkennung wird in Kapitel 5.3.2.3 genau erklärt.

Der Magnetfeldsensor nutzt ebenfalls das in Abbildung 16 dargestellte Koordinatensystem. Mit ihm wird das lokale Magnetfeld gemessen, dabei orientiert sich der Sensor am Erdmagnetfeld. Die Werte des Magnetfeldsensors können durch andere elektrische Geräte beeinflusst werden. Ihre magnetischen Felder nehmen manchmal Werte in der Größenordnung des Erdmagnetfeldes an. Die Daten des Magnetfeldsensors geben dem erkannten Schritt eine Ausrichtung.

### 5.3.2.2 Referenzpunkte laden

Für den Abgleich der aktuellen WLAN Informationen mit den Referenzpunkten aus der Datenbank werden zunächst alle Punkte aus der Datenbank geladen und lokal zwischengespeichert. Dabei wird für jeden der Referenzpunkte die Vereinigung der vier aufgenommenen, unterschiedlichen Ausrichtungen durchgeführt. In der Vereinigung wird für jede MAC-Adresse die minimale Signalstärke gewählt.

### 5.3.2.3 Positionsbestimmung durch einzelne Sensoren

In diesem Kapitel wird für alle Sensoren einzeln anhand der für sie implementierten Verfahren die jeweilige Position berechnet. Die Position besteht dabei aus einer x und y Koordinate. Diese Koordinaten werden für die Visualisierung in Bildkoordinaten umgerechnet.

#### 1. WLAN

Nach jeder Messung durch den WLAN Sensor wird der aktuell gemessene Fingerprint mit den Referenzpunkten aus der Datenbank verglichen. Für die aus der Datenbank geladenen und über alle Ausrichtungen vereinigten Referenzpunkte wird die Euklidische Distanz, wie sie im Kapitel 2.3.3.1 dargestellt und erläutert wurde, berechnet. Dabei definiert sich die Distanz als Summe der quadratischen Abstände, die den Unterschied zwischen der Signalstärke im Referenzpunkt und dem aktuell gemessenen Wert für jeden Sender darstellen. Idealerweise bildet die Euklidische Distanz eines Online-Punktes über alle Referenzpunkte eine konvexe gekrümmte Kurve mit eindeutigem Minimum in nur einem Referenzpunkt. Dieser Verlauf ist in Abbildung 20 dargestellt, wobei a, b und c für verschiedene Referenzpunkte stehen.

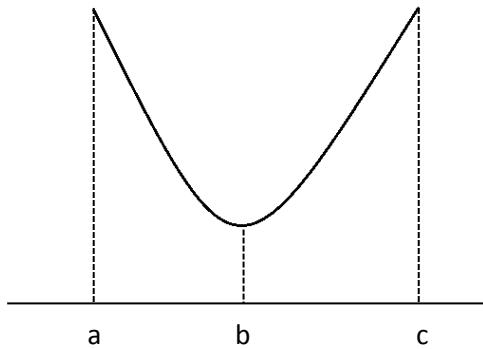


Abbildung 20: Ideale Euklidische Distanz

Bei Berechnung der Euklidischen Distanz können einseitig auftretende Signalstärken unterschiedlich berücksichtigt werden. Ist bei einer Berechnung eine MAC-Adresse nicht vorhanden, kann diese entweder ignoriert oder auf ein Minimum, wie beispielsweise -100 dB, gesetzt werden. Dies soll an einem Beispiel erklärt und die verschiedenen Verfahren vorgestellt werden.

Online-Punkt		Referenzpunkt	
MAC-Adresse	Signalstärke	MAC-Adresse	Signalstärke
MAC 1	OP_Signalstärke 1	MAC 1	Ref_Signalstärke 1
MAC 2	OP_Signalstärke 2	MAC 2	Ref_Signalstärke 2
MAC 3	OP_Signalstärke 3	-	-
-	-	MAC 4	Ref_Signalstärke 4

Abbildung 21: Beispiel möglicher MAC-Adressen und ihrer Signalstärken im Online- und Referenzpunkt

### *Verfahren 1:*

Die MAC-Adresse MAC 3 ist im Online-punkt vorhanden, nicht aber im Referenzpunkt. Eine Möglichkeit wäre die MAC 3 bei der Berechnung der Euklidischen Distanz des Online-Punktes zu diesem Referenzpunkt zu ignorieren. Die Adresse MAC 4, die im Referenzpunkt aber nicht in Online-Punkt sichtbar ist, wird ebenfalls ignoriert.

### *Verfahren 2:*

Für die Signalstärke der Adresse MAC 3 im Referenzpunkt wird ein minimaler Wert von -100 dB angenommen und der Abstand für MAC 3 lautet:

$$(-100 - \text{OP\_Signalstärke 3})^2$$

Adresse MAC 4 wird weiterhin nicht betrachtet.

### *Verfahren 3:*

Adressen die im Referenzpunkt aber nicht im Online-Punkt sichtbar sind werden betrachtet und nehmen einen minimalen Wert von -100 dB an. Adresse MAC 4 ist in diesem Beispiel lediglich im Referenzpunkt vorhanden. Der Abstand für MAC 4 nach diesem Verfahren lautet:

$$(\text{OP\_Signalstärke 4} - (-100))^2$$

Die Berechnung der Euklidischen Distanz ermöglicht als Position nur eine Zuordnung zu dem Referenzpunkt mit der kleinsten Distanz. Die Interpolation zwischen den Referenzpunkten erfolgt durch eine Gewichtung der  $k$  nächsten Nachbarn(basierend auf der Euklidischen Distanz).

Eine einfache Form die gewichtete Interpolation durchzuführen, ist eine Gewichtsverteilung nach der Shepard Methode [15]. Die Shepard Methode besitzt folgende Gleichung für die Bestimmung eines Gewichts:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}}$$

Dabei steht  $h$  für Euklidische Distanz und  $p$  für einen beliebigen positiven, reellen Wert, wobei hier der Wert 1 genommen wird. Die Verteilung ist normalisiert, da die Summe aller Gewichte 1 ergibt.

Die x- und y-Koordinaten des resultierenden Punktes berechnen sich aus der Summe der gewichteten Referenzpunkte der  $k$ -Nachbarschaft. Die Berechnungsvorschrift lautet:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i * f_i$$

## 2. Bluetooth

Die schwankenden Signalstärken der Bluetooth Sensoren und die mögliche Beeinflussung der Fingerprints durch unbekannte Bluetooth Sender führen dazu, dass Positionsbestimmungen durch Bluetooth mit einem anderen Ansatz als bei WLAN durchgeführt werden muss. Dabei werden nur Sender mit bekannter MAC-Adresse und Position berücksichtigt. Basierend auf einem Schwellwert werden besonders hohe Signalstärken einem Sender und damit seiner Position zugeordnet.

Die Bestimmung der Position mit dem Bluetooth Sensor erfolgt nur bei Signalstärken oberhalb des Schwellwerts, da im anderen Fall keine genaue Positionsbestimmung möglich ist. Die x- und y-Koordinaten der Position entsprechen der Mitte des Raumes in dem dieser Sender stationiert ist. Der Schwellwert zur Festlegung von qualitativ hochwertigen Signalstärken wird anhand der Abbildung 11 dimensioniert (vergleiche Kapitel 5.3.1.2). Für die Abbildung wurde detailliert erläutert, wo die einzelnen Aufnahmen stattgefunden haben. Das Schaubild zeigt für Stellen nahe dem entsprechenden Sender Signalstärken oberhalb von -64 dB, weshalb dieser Wert als Grenzwert festgelegt wird.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Anwendungen des Verfahrens an bestimmten Stellen.

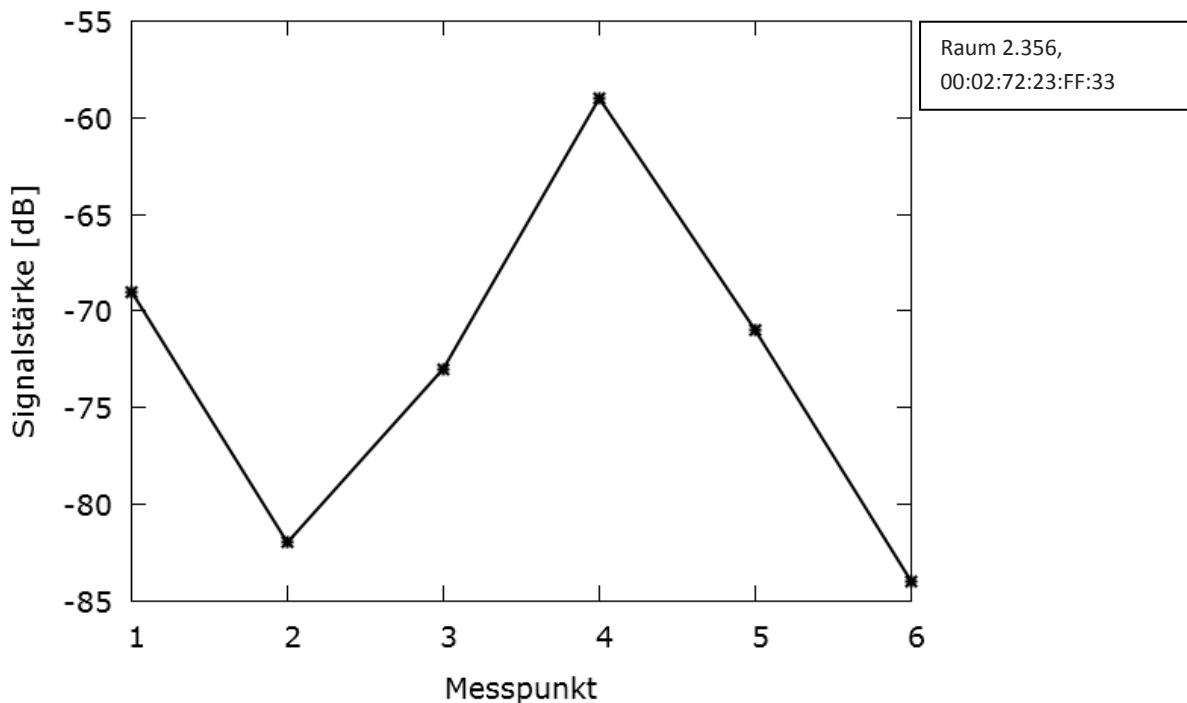


Abbildung 22: Bluetooth Signalstärken des Senders 00:02:72:23:FF:33

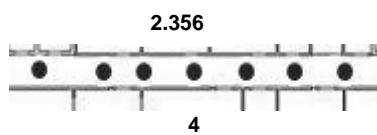


Abbildung 23: Positionen der Aufnahme von Bluetooth Signalen

Der Wert über -64 dB im Messpunkt 4 entspricht genau der Position vor dem Raum 2.356, was die obere Aussage nochmals bekräftigt.

### 3. Beschleunigungssensor und Kompass

Im Kapitel 5.3.2.1 über die Sensormessung von Beschleunigung und Kompass wurde bereits begründet, dass die durch Vorwärtsschritte verursachte Beschleunigung immer auf der y- und z-Achse zu sehen ist. Für die Erkennung eines Schrittes wird in diesem Positionierungssystem die Summe dieser zwei Achsen benutzt. Sie enthalten die lageabhängigen Anteile der Gravitationskraft, welche sich dadurch einfach herausrechnen lässt. Ferner werden auch die durch Schritte erzeugten Beschleunigungen unabhängig von der Lage des Smartphones erfasst.

Die Schritterkennung erfolgt durch Mustererkennung in den Beschleunigungswerten. Dabei wird eine positive Beschleunigung gefolgt von einer negativen Beschleunigung innerhalb einer definierten Maximaldauer gesucht. Empirisch wird ein bestimmter oberer und unterer Schwellwert definiert, den die Beschleunigung für einen Schritt beim Abstoßen überschreiten bzw. beim Auftreten unterschreiten muss. Ferner muss der Schritt in einem ebenfalls empirisch bestimmten Zeitintervall beendet werden. Erst wenn diese drei Kriterien erfüllt sind, wird ein Schritt signalisiert. Für den oberen Schwellwert wird festgelegt, dass die Summe der Beschleunigung für einen Schritt größer als  $11.5 \text{ m/s}^2$  sein muss und für den unteren entsprechend  $10.5 \text{ m/s}^2$ . Jeder Schritt muss in weniger als 700 ms beendet sein.

Die Länge eines Schrittes wird für die Testperson gemessen und kann später über die Oberfläche oder automatisch bestimmt werden.

Um dem Schritt eine Richtung zu geben, wird die Ausrichtung des Smartphones bestimmt. Dazu wird das in Abbildung 16 gezeigte lokale Koordinatensystem in das Weltkoordinatensystem aus Abbildung 24 transformiert. Für die Transformation sind die Beschleunigungswerte und Werte des Magnetfeldsensors zu verwenden.

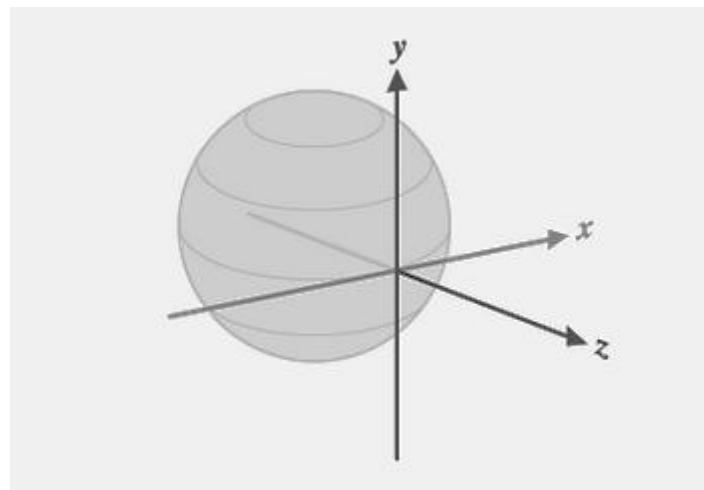


Abbildung 24: Weltkoordinatensystem [16]

Die Achsen bilden ein orthogonales System [16] auf der Erdoberfläche. Die x-Achse ist dabei tangential zum Boden und nach Osten ausgerichtet. Die y-Achse ist tangential zum Boden nach Norden ausgerichtet und die z-Achse hat eine senkrecht zum Boden in den Himmel zeigende Ausrichtung.

Nach der Transformation in das Weltkoordinatensystem und der Bestimmung der Rotationsmatrix, wird schließlich mit Hilfe dieser Matrix die Ausrichtung des Smartphones berechnet. Die Ausrichtung nutzt ein anderes Koordinatensystem, das in Abbildung 25 dargestellt ist.

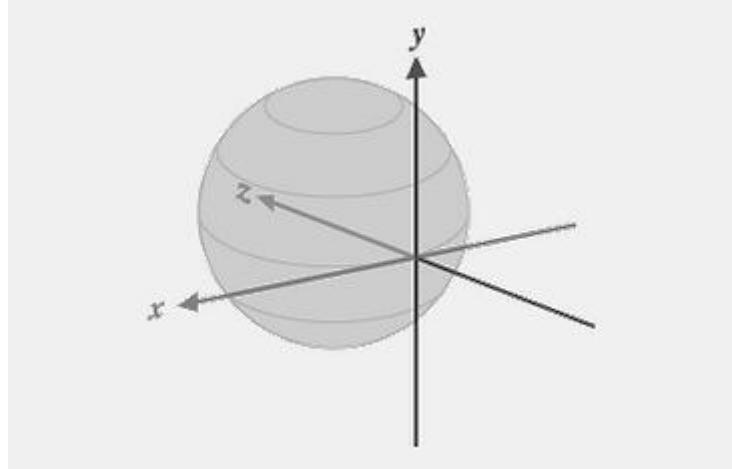


Abbildung 25: Koordinatensystem für die Ausrichtung [16]

Das Koordinatensystem ist um  $180^\circ$  um die y-Achse gedreht. Die aus dem Kompass ermittelte Ausrichtung liefert ein Feld von drei verschiedenen Werten. Der Azimuth [16] bezeichnet die Drehung des Smartphones um die z-Achse und stellt den Winkel zum geomagnetischen Norden dar. Der Pitch stellt die Rotation des Smartphones um die x-Achse und der Roll die Rotation um die y-Achse. Alle Winkel sind Radialwerte.

Für das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit ist lediglich die Porträtsansicht der Anwendung möglich, daher wird nur der Azimuthwinkel zur Ausrichtung herangezogen. Der Azimuthwinkel kann Werte zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  annehmen. Die Ausrichtung des Smartphones berechnet sich aus dem Azimuthwinkel und der schätzungsweise bestimmten radialen Ausrichtung des Informatikgebäudes nach Norden. Dieser Wert beträgt:

$$NORD = 274^\circ * \frac{\pi}{180^\circ} \text{ [rad]}$$

Die Ausrichtung des erkannten Schritts berechnet sich dementsprechend nach folgender Vorschrift:

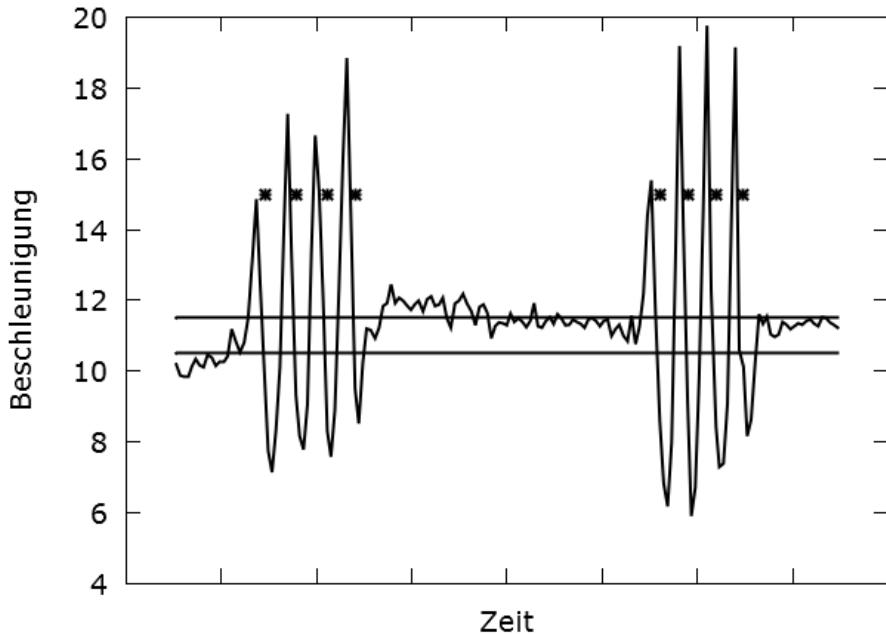
$$ausrichtung = azimuth + NORD$$

Die Positionsbestimmung lautet wie folgt:

$$x_{neu} = x_{alt} + \cos(ausrichtung) * SCHRITTLÄNGE$$

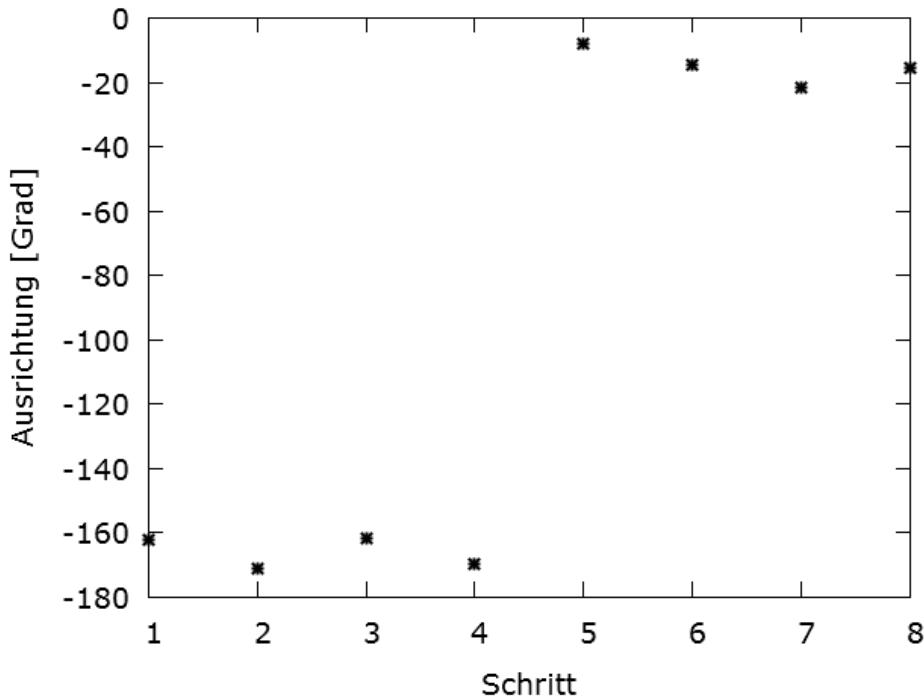
$$y_{neu} = y_{alt} + \sin(ausrichtung) * SCHRITTLÄNGE$$

Zu Beginn werden x und y mit der Positionsbestimmung durch WLAN oder Bluetooth gesetzt. Mit der Schritterkennung kann somit nur die relative Position bezüglich der letzten Synchronisierung mit anderen Sensoren bestimmt werden. Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen die Schritterkennung und die Ausrichtung des Bewegungsprofils welches bereits in Kapitel 5.3.2.1 über den Beschleunigungssensor und den Kompass erwähnt wurde.



**Abbildung 26: Schritterkennung**

In Abbildung 26 sind die vier Schritte, die Pause und die weiteren viere Schritte deutlich zu sehen. Die Beschleunigungen beim Abstoßen und Auftreten eines Schrittes liegen über bzw. unter den beiden bestimmten Schwellwerten, die durch zwei horizontale Linien in der Abbildung dargestellt sind. Der Punkt neben jedem Peak steht für einen erkannten Schritt.



**Abbildung 27: Ausrichtung**

Die ersten vier Schritte verliefen in Richtung Süden und die vier Schritte nach der Pause in Richtung Norden. Abbildung 27 zeigt die Werte des Kompasses in Grad während der gesamten 8 Schritte. Die letzten Schritte weisen einen Winkel nahe  $0^\circ$ , was der Himmelsrichtung Nord entspricht. Die ersten vier Schritte dagegen haben einen Winkel nahe  $180^\circ$ , was entsprechend entgegengesetzt der Nordausrichtung ist und damit für die Himmelsrichtung Süd steht.

#### 5.3.2.4 Kombinierte Positionsbestimmung

Nachdem für jeden einzelnen Sensor eine eigene Position des Smartphones im Gebäude berechnet worden ist, wird anschließend eine Position aus allen vorhandenen Informationen bestimmt. Dabei werden die unterschiedlichen Sensoren je nach Qualität unterschiedlich gewertet. Die Positionsbestimmung erfolgt nach folgendem Schema:

1. Werden für einen der bekannten Bluetooth Sender Signalwerte oberhalb des Schwellwertes gemessen, erfolgt die Positionierung durch die bekannte Position des Senders. Da die Positionen der Bluetooth Sender im Gegensatz zu WLAN Access Points bekannt sind, hat dies oberste Priorität. Gleichzeitig wird die Position des Schrittzählers synchronisiert.
2. Andernfalls erfolgt die Positionierung durch das WLAN unter Zuhilfenahme der Bewegungserkennung durch den Schrittzähler. Dabei wird die Bewegungserkennung nur berücksichtigt, wenn sie die Positionsbestimmung durch WLAN verfeinern kann. Andernfalls wird die Position mit der Shepard Methode bestimmt.
3. Um sicherzustellen, dass die Bewegungserkennung nicht von der aktuellen Position abdriften kann, wird die Bewegungserkennung in periodischen Abständen mit der aktuellen kombinierten Position synchronisiert. Dadurch entsteht eine bidirektionale Kopplung zwischen der Bewegungserkennung und dem WLAN- bzw. Bluetooth Sensor: Die Bewegungserkennung beseitigt Mehrdeutigkeiten und verhindert somit große Sprünge oder unstetige Positionierung durch WLAN oder Bluetooth.

Die WLAN bzw. Bluetooth Sensoren wiederum verhindern ein Abdriften der Bewegungserkennung durch Aufsummieren von fehlerhaften Sensorwerten. Die erste Kopplung wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

#### 5.3.2.4.1 Multisensorverfahren

Bei der Fingerprinting Methode wird angenommen, dass

1. Der nächste Fingerprint am besten passt (minimale Kosten bezüglich einer Kostenfunktion)
2. Es nur einen Fingerprint mit minimalen Kosten gibt (Eindeutigkeit)

Auf einer eindimensionalen Umgebung (z.B. Korridor) sieht die Kostenfunktion idealerweise wie folgt aus:

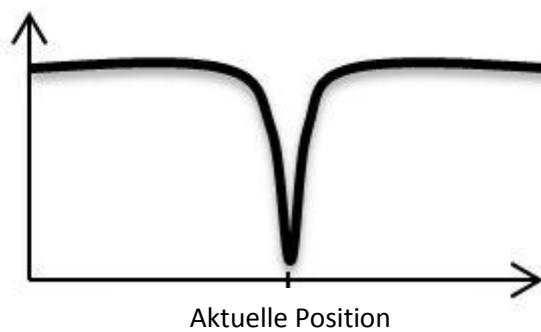


Abbildung 28: Ideale Kostenfunktion

Die Stellen auf der x-Achse markieren dabei die Fingerprints und auf der y-Achse die Kosten. Die Funktion hat ein Minimum beim nächsten Fingerprint. Alle anderen Stellen weisen hohe Kosten auf.

In der Realität hat die Kostenfunktion jedoch einen der folgenden Verläufe:

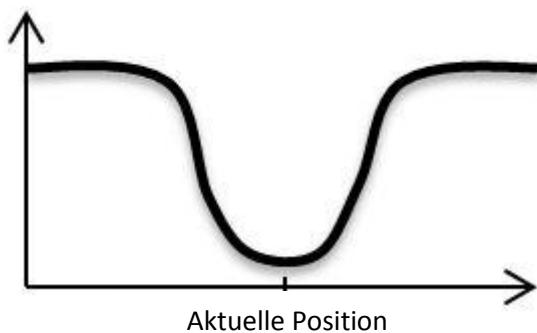
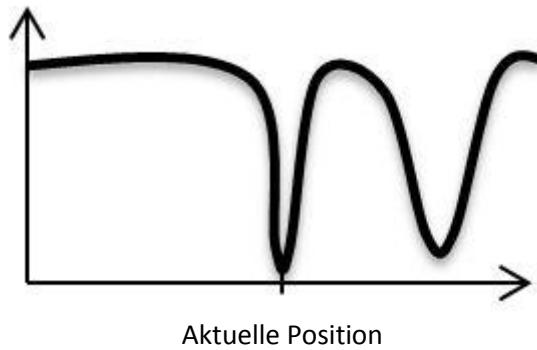
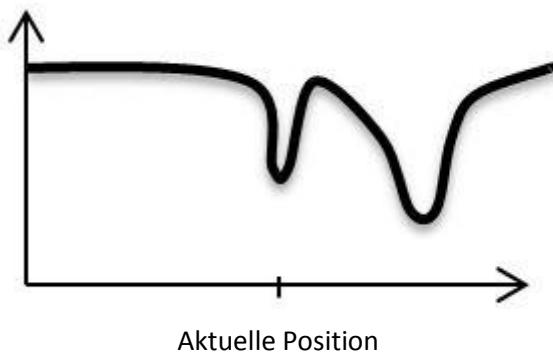


Abbildung 29: Unscharfe Kostenfunktion: Das Minimum erstreckt sich über mehrere Referenzpunkte hinweg.

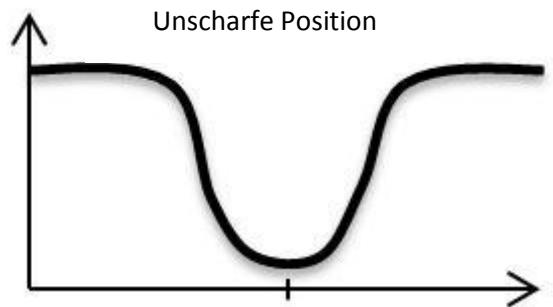


**Abbildung 30: Mehrdeutige Kostenfunktion: Durch Störeinflüsse weisen andere Stellen ähnlich niedere Kosten auf.**

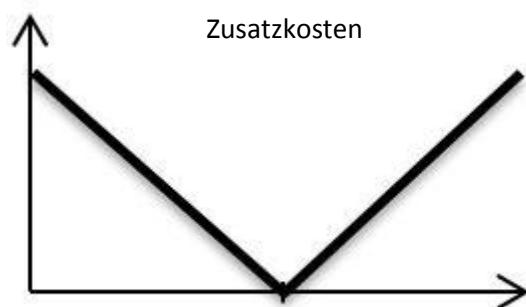


**Abbildung 31: Falsche Kostenfunktion: Durch Störeinflüsse weist die richtige Stelle nicht die minimalen Kosten auf.**

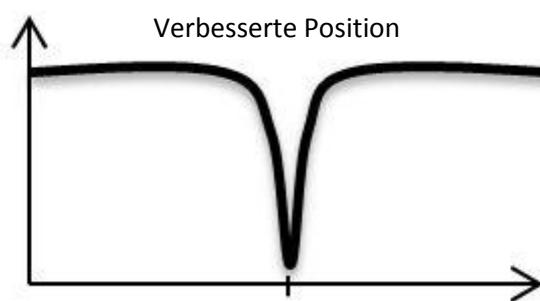
Alle drei Fälle können kompensiert werden, wenn die aktuelle Position zumindest annährend bekannt ist. Diese Information liefert die Bewegungserkennung. Die grundlegende Idee ist, zusätzlich zu der Fingerprinting Methode weitere Kosten zu verteilen. Die zusätzlichen Kosten hängen dabei vom Abstand des Referenzpunktes zur aktuellen Position der Bewegungserkennung ab. Wegen der Stetigkeit der Position haben weit entfernte Punkte eine geringere Wahrscheinlichkeit. Sie werden dementsprechend mit hohen Zusatzkosten versehen. Dadurch werden Positionen nahe der Bewegungserkennung begünstigt. Abbildung 32 zeigt schematisch das Verfahren.



+



=



**Abbildung 32: Verfahren bei Begünstigung von Positionen nahe der Bewegungserkennung**

Für die kombinierte Position werden die bereits berechneten Kosten der Shepard Methode mit den Zusatzkosten versehen. Anschließend werden die Referenzpunkte erneut nach Kosten sortiert und nach der Shepard Methode interpoliert.

Jeder Euklidischen Distanz in einem Referenzpunkt wird ein Gewicht basierend auf dem Abstand dieses Referenzpunktes zu der Position des Schrittzählers vergeben. Die Formel zur Vergabe von Gewichten lautet:

$$\text{Kosten} * \text{Alte Kosten} * \left( \frac{\text{Abstand zum Schrittzähler}}{d^*} + 1 \right)$$

Die Konstante  $d^*$  bestimmt den Einfluss der Bewegungserkennung. Die aktuelle Position behält ihre Kosten (Faktor 1). Referenzpunkte mit Abstand  $d^*$  haben doppelte Kosten usw.

Für das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit wird für  $d^*$  der doppelte Abstand zwischen zwei Referenzpunkten gewählt, d.h.  $d^* = 7,2$ .

Damit die Bewegungserkennung nicht immer die Positionierung durch WLAN überstimmt, wird ein Schutzmechanismus eingeführt. Dieser bewirkt, dass die Bewegungserkennung lediglich Mehrdeutigkeiten und Unschärfen auflöst, jedoch nicht selbst die Position bestimmt. Dazu wird überprüft, ob die Position der Bewegungserkennung nahe einer Position mit niedrigen Kosten der Fingerprinting Methode liegt. Ist dies nicht der Fall, wird auf die Verwendung der Bewegungserkennung verzichtet. Somit ist sichergestellt, dass im Ausnahmefall die Position alleine durch WLAN bestimmt werden kann und die Bewegungserkennung resynchronisiert wird.

Das Kriterium wird wie folgt bestimmt:

1. Bestimmung der  $k$  nächsten Nachbarn nach der Fingerprinting Methode (liegen bereits vor aus Abschnitt 5.3.2.3)
2. Bestimmung der  $k$  nächsten Nachbarn nach dem Euklidischen Abstand der Referenzpunkte zur Bewegungserkennung
3. Schnittbildung aus 1. und 2.

Liegen im Schnitt keine Referenzpunkte, positionieren die Bewegungs- und Funksensoren in disjunkte Regionen. In diesem Fall wird nur die Position der Shepard Methode berücksichtigt.

Ist der Schnitt nicht leer, befindet sich die Bewegungserkennung im Bereich der Interpolationsstützstellen nach der Shepard Methode. In diesem Fall wird die Bewegungserkennung genutzt, das Kostenminimum durch Neugewichtung der Stützstellen zu verfeinern.

#### **5.3.2.5 Visualisierung**

Das Smartphone zeigt in der Online-Phase das Bild der Testumgebung an (siehe Abbildung 2). Die berechnete, kombinierte Position wird durch einen Punkt im Bild dargestellt. Dieser ist vom Nutzer nicht veränderbar, sondern nur durch die Berechnung einer neuen Position setzbar. Die berechneten Positionen der einzelnen Sensoren werden wegen der Übersichtlichkeit nicht angezeigt.

## 6 Evaluierung

Nachdem im letzten Kapitel die Umsetzung eines Multisensorverfahrens zur Positionsbestimmung beschrieben wurde, widmet sich dieses Kapitel der Evaluierung der Funktionsweise der entwickelten Verfahren. Dazu werden die Verfahren der einzelnen Sensoren sowie die Kombination aller Sensoren untersucht und gegenübergestellt.

### 6.1 Evaluierungsverfahren

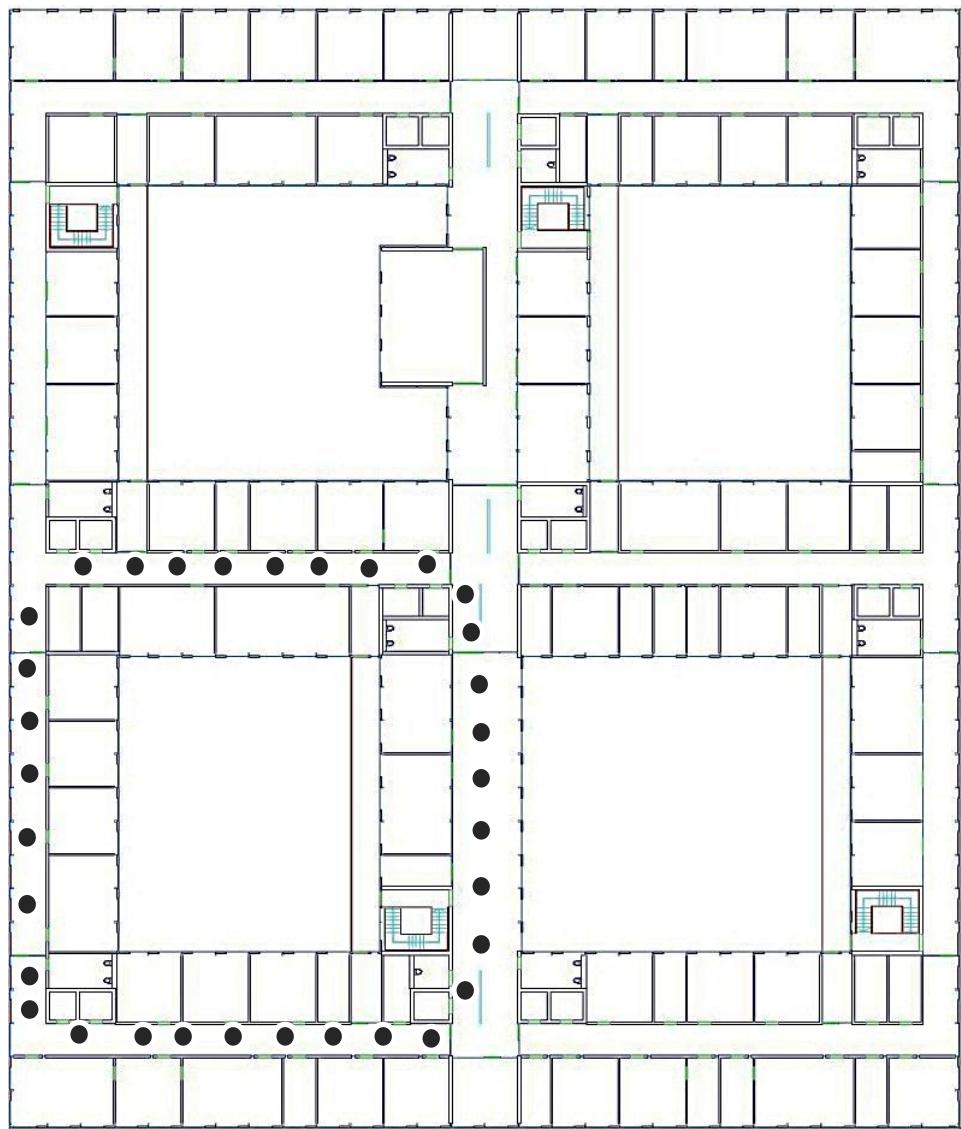
Das zu evaluierende Verfahren benötigt zur Positionsbestimmung Referenzdaten in Form von Fingerprints, die das Navigationsgebiet abdecken. Diese werden mit dem Testgerät in der Testumgebung gesammelt. Die Referenzdatenbank speichert diese Fingerprints und kennzeichnet sie als Offline-Daten. Jeder Fingerprint enthält, wie oben beschrieben die Position und die Menge der verfügbaren MAC-Adressen für WLAN und Bluetooth zusammen mit ihren Signalstärken.

Für die Evaluierung werden während der Online-Phase alle zur Positions berechnung verwendeten Daten an verschiedenen, über den Testbereich verteilten Positionen gespeichert. Sie entsprechen in etwa den Fingerprints der Offline-Phase, werden jedoch als Testdaten markiert. Wie in der Offline-Phase wird auch hier die Position der Aufnahme gespeichert. Im Gegensatz zur Offline-Phase wird sie hier jedoch nur als Vergleichswert für die Evaluation herangezogen und ist nicht Teil der Berechnungsangaben.

Die Position der Fingerprints wird sowohl in der Offline-Phase als auch für die Testdaten durch den Benutzer manuell bestimmt und unterliegt damit unweigerlich einem Fehler. Der Maßstab der Karte beträgt 0,06224 Meter. Unter der Annahme, dass der Benutzer die Position auf 10 Pixel genau bestimmen kann, hat die Position eine Genauigkeit von 0,6224 Meter. Diese Genauigkeit genügt in den meisten Fällen, da die Software die Position nicht genauer angeben muss als der Benutzer sie selbst bestimmen kann.

#### 6.1.1 Referenzpunkte und Testumgebung

In der Testumgebung, die sich wegen der stationären Bluetooth Sender, auf den unteren linken Quadranten des zweiten Obergeschosses beschränkt, werden 34 verschiedene Fingerprints bzw. Referenzpunkte in Abständen von ca. 3,6 Meter aufgenommen. Damit ist der gesamte Quadrant durch Referenzpunkte abgedeckt. Abbildung 33 zeigt die Positionen der 34 Referenzpunkte.



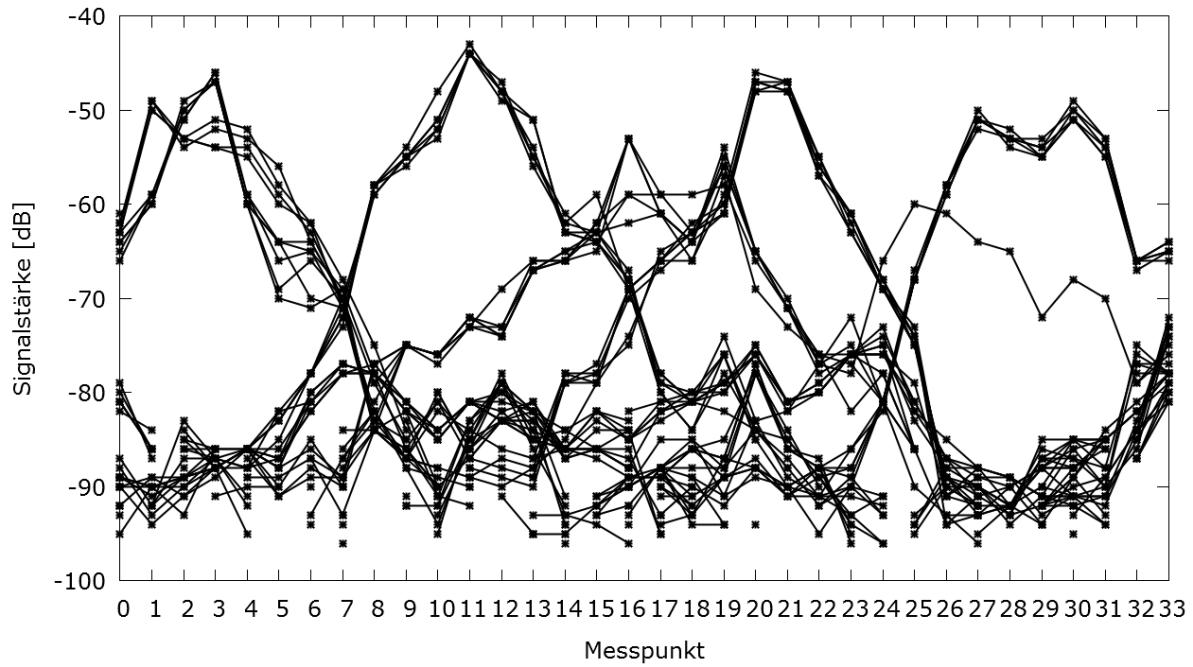
**Abbildung 33: Referenzpunkte in der Testumgebung**

Die durch schwarze Punkte gekennzeichneten Stellen in der Abbildung 33, sind die 34 verschiedenen Referenzpunkte.

Bevor die Verfahren zur Positionsbestimmung betrachtet werden, soll zunächst die Abdeckung der oben gezeigten Referenzpunkte mit WLAN und Bluetooth untersucht werden.

#### **6.1.1.1 Abdeckung der Testumgebung durch WLAN**

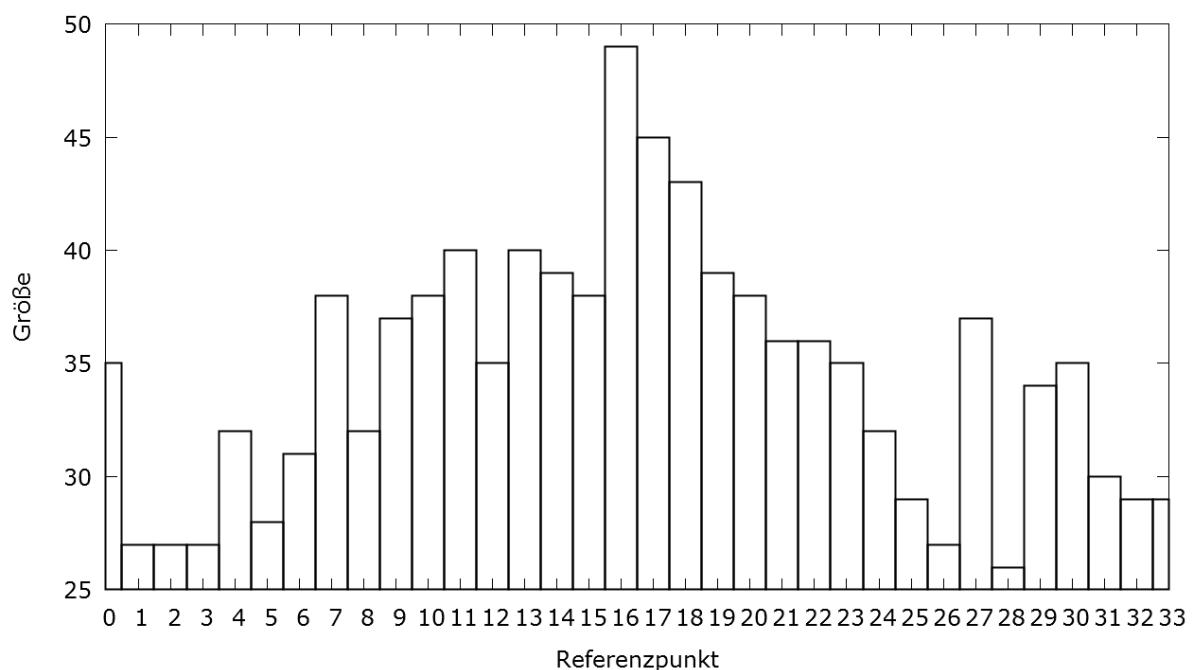
Zur Untersuchung der Abdeckung mit WLAN Signalen in der Testumgebung werden für alle Referenzpunkte die Informationen der vier Ausrichtungen zunächst vereinigt (vergleiche Kapitel 5.2.2.2). Anschließend werden die Signalstärken jeder MAC-Adresse über die 34 Referenzpunkte dargestellt. Abbildung 34 zeigt die Signalstärken der WLAN Access Points über die Referenzpunkte.



**Abbildung 34: Abdeckung von WLAN in der Testumgebung**

Die Testumgebung, wie aus Abbildung 34 zu erkennen ist, weist eine relativ hohe Anzahl verschiedener WLAN Access Points auf. Außerdem sieht man, dass in jedem der vier Korridore ein Maximum einiger Kurven besteht. Die starken Anstiege einzelner Signale zeigen, dass sich die Referenzpunkte voneinander unterscheiden lassen. In fast allen Referenzpunkten gibt es ein oder mehrere Signale mit hohen Signalstärken.

Abbildung 35 veranschaulicht die Größe der Fingerprint Vektoren.

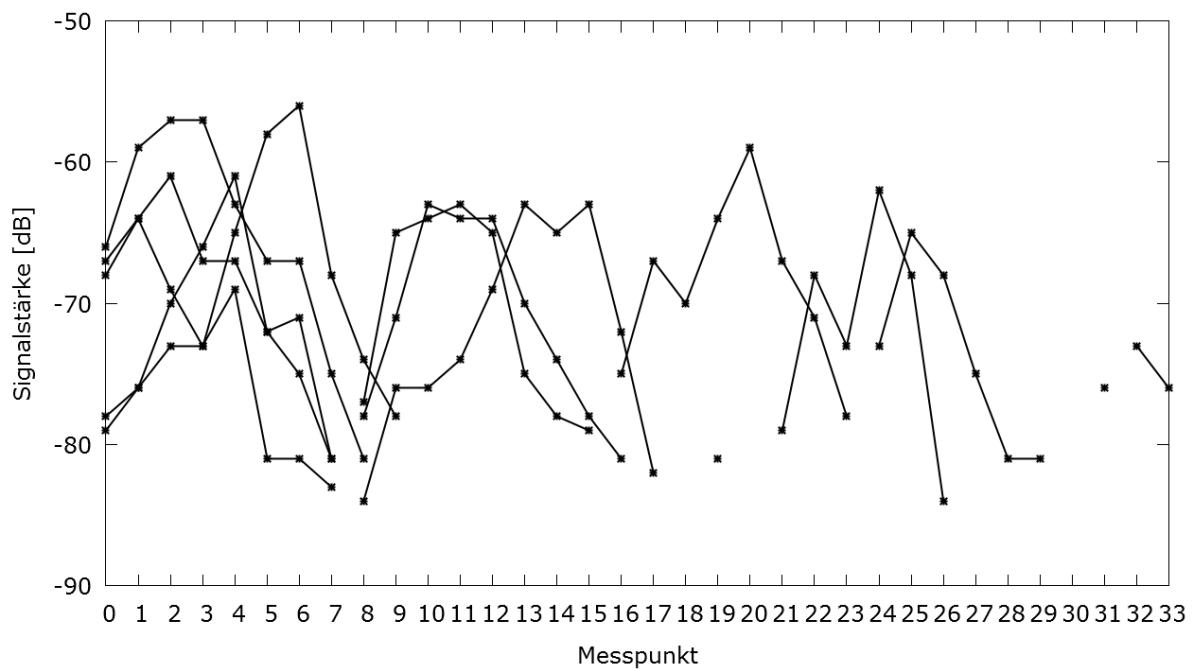


**Abbildung 35: Anzahl sichtbarer WLAN Access Points in jedem Referenzpunkt**

Referenzpunkt 28 weist die kleinste Zahl verschiedener Access Points auf. Jedoch ist diese immer noch größer als 25. Das Informatikgebäude weist damit eine relativ dichte WLAN Infrastruktur auf, die Positionierung an allen Stellen zulässt.

#### 6.1.1.2 *Bluetooth Abdeckung der Testumgebung*

Obwohl Bluetooth nicht mit der Fingerprinting Methode genutzt wird, soll hier trotzdem die Abdeckung der Testumgebung mit den stationären Bluetooth Sendern geprüft werden. Die 34 Referenzpunkte bieten eine gute Gelegenheit das Verhalten der Bluetooth Signale über alle Korridore der Testumgebung noch einmal anzuschauen. Auch in diesem Fall werden die Daten der vier Richtungen zunächst vereinigt (vergleiche Kapitel 5.3.2.2). In Abbildung 36 sind Signalstärken aller verfügbaren MAC-Adressen für die 34 Referenzpunkte zu sehen.



**Abbildung 36: Abdeckung von Bluetooth in der Testumgebung**

Das Diagramm in Abbildung 36 zeigt, dass jede MAC-Adresse einen Peak in der Signalstärke hat, der über der im Verfahren festgelegten Schwelle von -64 dB liegt. Die Verteilung der Bluetooth Sender war bereits festgelegt. Das Diagramm zeigt, dass diese noch verbessert werden kann, um die Stellen mit hochwertigen Signalen besser zu verteilen. Die genaue Anzahl der Bluetooth Sender in jedem Referenzpunkt hat keine Bedeutung für die Positionsbestimmung im Gebäude und wird daher auch nicht weiter untersucht.

## 6.2 Ergebnisse

### 6.2.1 WLAN

Die Bestimmung der Position mit WLAN erfolgt mit Hilfe eines gewichteten kNN. Die Bildung der Gewichte basiert auf einer inversen Gewichtung der Euklidischen Distanzen, auch bekannt als die Shepard Methode (vergleiche Kapitel 5.3.2.3).

Bereits bei der Umsetzung für Positionsbestimmung auf den WLAN Daten (vergleiche Kapitel 5.3.2.3) wurde erwähnt, dass der Abgleich zwischen den Informationen in Referenzpunkten und aktuellen Informationen unterschiedlich erfolgen kann. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten für die Behandlung von Access Points, die nur im Referenz-Fingerprint oder dem Fingerprint der Online-Phase auftreten. Dabei können entweder nur im Schnitt auftretende Adressen berücksichtigt werden oder fehlende Messwerte auf einen Minimalwert nahe dem schlechtesten gemessenen Wert gesetzt werden. Für das Testgerät beträgt dieser Wert -100 dB. Mit der zweiten Variante liegen alle auftretenden MAC-Adressen in der Schnittmenge. Signalpaare für eine MAC-Adresse mit hohem Wert im Referenzpunkt und einem fehlenden Wert in der Online-Messung oder umgekehrt werden dadurch mit einer groben Distanz als sogenannte Antikorrespondenz in die Metrik des Fingerprints miteinbezogen. Sie entkräften eine mögliche Korrespondenz des Online-Fingerprints und des Referenzpunktes. In diesem Abschnitt wird auf jedes dieser Verfahren eingegangen und die Genauigkeit der Berechnung überprüft. Ferner muss noch festgelegt werden wie groß das  $k$  bei dem kNN sein soll um minimale Abweichungen bzw. genaue Werte bei Positionsbestimmung zu bekommen.

Die Art der Berechnung Euklidischer Distanzen und die Bestimmung von  $k$  ist Teil der nächsten Abschnitte.

#### 6.2.1.1 Berechnung der Euklidischen Distanz mit Ignorieren fehlender Adressen

Als erstes wird für die Berechnung der Distanzen zu allen Referenzpunkten jede fehlende Adresse die im Online-Punkt vorhanden ist aber nicht im Referenzpunkt einfach ignoriert. Zur Auswertung wurden 18 verschiedene Aufnahmen der WLAN Infrastruktur in der Testumgebung herangezogen und durch Bildung der jeweiligen Distanzen zu den 34 Referenzpunkten sowie ihrer Gewichte zu einer Position ausgewertet. Abbildung 37 zeigt die Abweichungen des gewichteten kNN für  $k = 2$  zu den manuell bestimmten Positionen der 18 Aufnahmen.

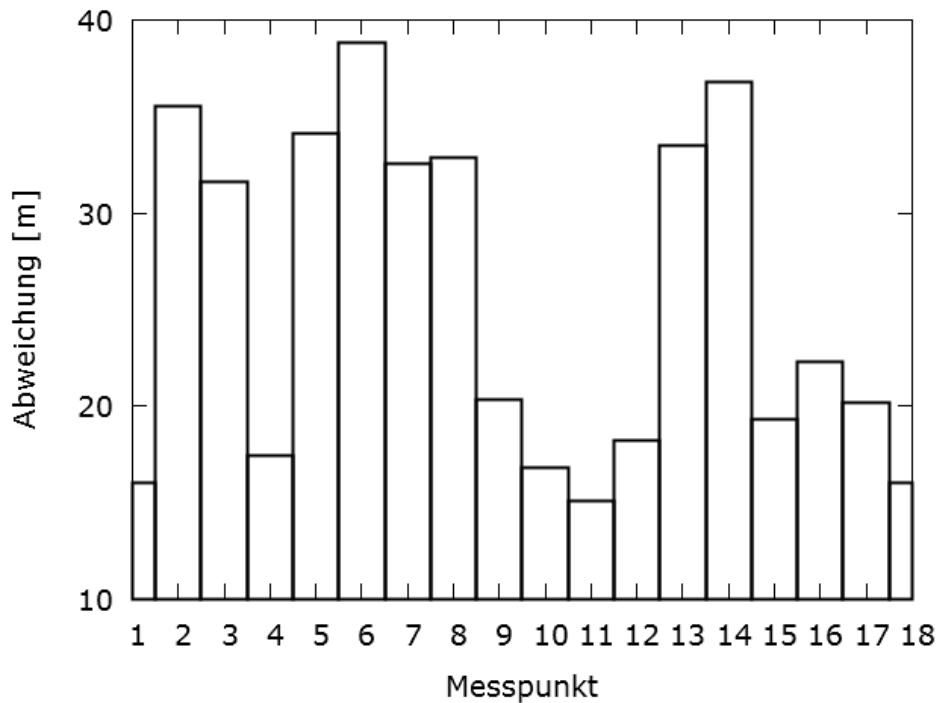


Abbildung 37: Gesamtabweichung bei Ignorieren von fehlenden Adressen und  $k = 2$

Die Messpunkte im Diagramm der Abbildung 37 besitzen alle eine Abweichung von über 10 Metern. In einigen Messpunkten beträgt sie sogar knapp 40 Meter. Ungenauigkeiten in dieser Größenordnung können das Testgerät und seinen Nutzer nicht einmal dem richtigen Korridor in der Testumgebung zuordnen.

Da diese großen Abweichungen für die 2 besten Distanzen entstehen, kann auch eine Erhöhung von  $k$  keine deutliche Verbesserung bringen. Dieser Ansatz bietet daher keine akzeptablen Genauigkeiten bei der Positionsbestimmung und wird nicht weiter verfolgt.

#### 6.2.1.2 Berechnung der Euklidischen Distanz mit Betrachtung fehlender Adressen

Nachdem im letzten Abschnitt festgestellt wurde, dass das Ignorieren fehlender MAC-Adressen große Abweichungen zu der tatsächlichen Position verursacht, wird in diesem Abschnitt für jede im Online-Punkt aber nicht im Referenzpunkt enthaltene Adresse ein Minimum von -100 dB angenommen. Ferner besteht die Möglichkeit, dass wenn bei fehlenden Informationen ein Minimum festgelegt wird auch einen umgekehrten Abgleich zu machen. Dies bedeutet für alle im Referenzpunkt aber nicht im Online-Punkt vorhandenen Adressen kann dieses Minimum ebenfalls angenommen werden. Abbildung 38 zeigt wie groß der Maximale Fehler ist wenn jeder fehlenden Adresse ein minimaler Wert von -100 dB zugewiesen wird. Alle Ergebnisse beziehen sich auf dieselben 18 Testpunkte wie im letzten Abschnitt. Die gestrichelte Linie steht dabei für die Abweichung, die entsteht, wenn die Euklidische Distanz auch die umgekehrten Informationen bzw. die Informationen des Referenzpunktes miteinbezieht.

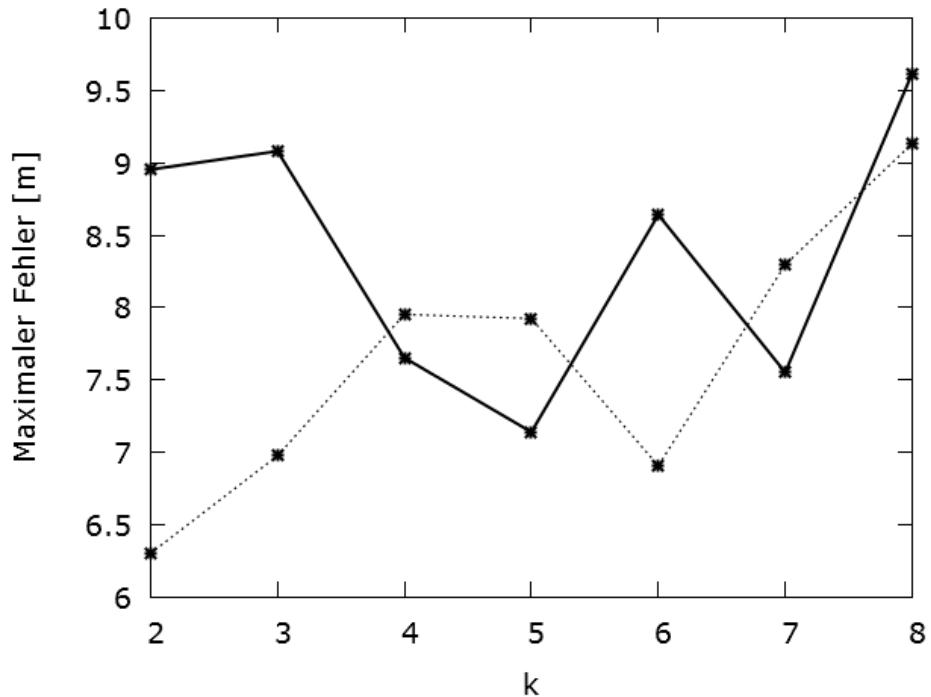


Abbildung 38: Maximaler Fehler unter Berücksichtigung fehlender Adressen

Aus Abbildung 38 ist ersichtlich, dass der maximale Fehler über alle  $k$  bei beiden Verfahren den Wert von 9,6 Meter nicht übersteigt, was in einer deutlich kleineren Größenordnung liegt als beim Ignorieren von fehlenden Adressen.

Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit wird basierend auf den Erkenntnissen der zwei letzten Abschnitte keine Informationen ignorieren sondern ein Minimum von -100 dB für jede fehlende Information annehmen. Welches der zwei verschiedenen Verfahren und welches  $k$  besser ist, ist Thematik des nächsten Abschnitts.

#### 6.2.1.3 Bestimmung des Verfahrens bei Berechnung der Euklidischen Distanz und der Größe von $k$

Zur Bildung der Euklidischen Distanzen eines Online-Punktes zu jedem Referenzpunkt werden die Abstände der Signalstärken aller gleichen MAC-Adressen gebildet. Im Online-Punkt aber nicht im Referenzpunkt enthaltene Adressen werden wie im letzten Abschnitt erklärt auf ein Minimum von -100 dB gesetzt. In diesem Abschnitt soll zunächst geklärt werden, ob Adressen die im Referenzpunkt aber nicht im Online-Punkt vorhanden sind auch zur Bildung der Euklidischen Distanz betrachtet werden sollen. Die nachfolgenden zwei Abbildungen zeigen den Mittleren Fehler und die Standardabweichung der Positionsbestimmungen der in den letzten Abschnitten verwendeten 18 Testpunkte mit den zwei unterschiedlichen Berechnungen und über verschiedene  $k$ . Die gestrichelte Linie stellt wieder das Verfahren mit der expliziten Betrachtung der Informationen aus dem Referenzpunkt dar.

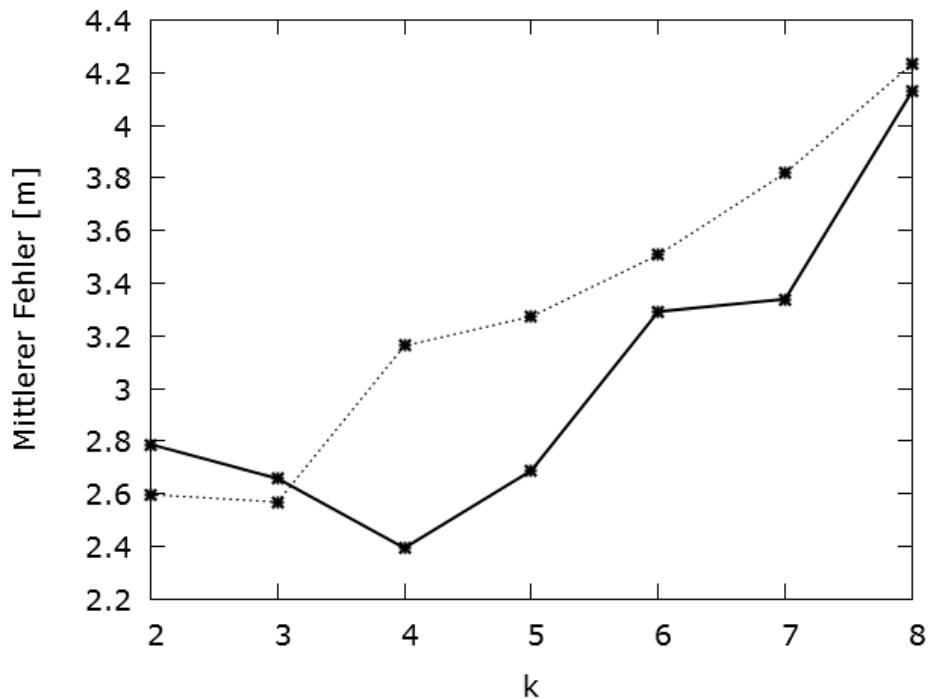


Abbildung 39: Mittlerer Fehler unter Berücksichtigung fehlender Adressen

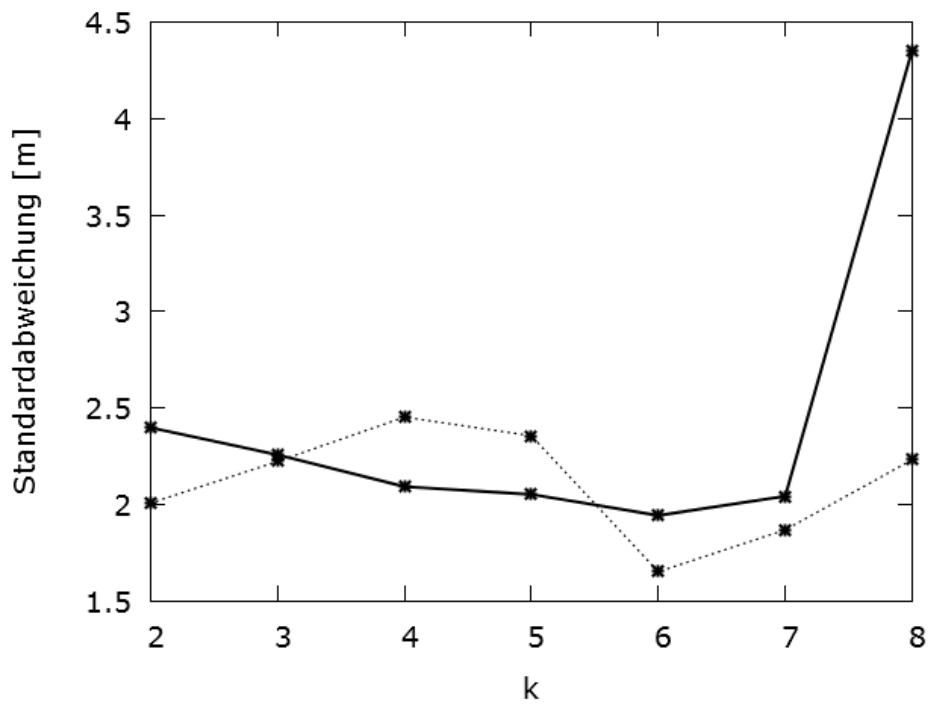


Abbildung 40: Standardabweichung unter Berücksichtigung fehlender Adressen

Abbildung 39 zeigt, dass der kleinste Mittlere Fehler bei dem Verfahren in dem Adressen aus dem Referenzpunkt nicht mit den Online-Punkten verglichen werden bei  $k = 3$  erreicht wird und für das andere Verfahren liegt das Minimum bei  $k = 4$ .

Beide Verfahren haben in den Punkten mit dem kleinsten Mittleren Fehler auch eine geringe Standardabweichung. Bei beiden Verfahren steigt der Mittlere Fehler ab dem Minimum mit  $k$ .

Die Maximalen Fehler für  $k = 3$  und  $k = 4$  der jeweiligen Verfahren die in Abbildung 38 dargestellt worden sind, unterscheiden sich nur geringfügig. Jedoch zeigen der Mittlere Fehler und die Standardabweichung, dass im Mittel das Verfahren ohne explizite Betrachtung der Informationen aus dem Referenzpunkt für  $k = 4$  besser ist als das andere Verfahren für  $k = 3$ .

Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit nutzt basierend auf den Erkenntnisse der letzten Abschnitte für die WLAN Positionierung einen gewichteten kNN mit  $k = 4$ . Die Berechnung der Euklidischen Distanz zu einem Referenzpunkt erfolgt mit einem Vergleich der Signalstärken aller MAC-Adressen aus dem Online-Punkt mit dem jeweiligen Referenzpunkt. Im Referenzpunkt nicht vorhandene Adressen weisen eine minimale Signalstärke von -100 dB auf. Der umgekehrte Vergleich zwischen Referenzpunkt und Online-Punkt wird nicht weiter betrachtet.

### 6.2.2 Bluetooth

Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit nutzt Signalstärken bekannter Bluetooth Sender die über -64 dB liegen um die Position des Testgerätes im Testgebäude zu bestimmen. Gemessene Signalstärken in dieser Größenordnung bedeuten wie im Kapitel 5.3.1.2 und Kapitel 5.3.2.3 argumentiert, dass sich der Empfänger in der Nähe des Senders befinden muss. Als Position im Korridor wird in diesem Fall die Mitte des Raumes in dem der Sender stationiert ist angegeben.

Für die Evaluierung der Positionsbestimmung mit Hilfe des Bluetooth Sensors wird überprüft, über welche Strecken hohe Signalstärken eines Senders gemessen werden können und mit welchen Genauigkeiten der richtige Raum bestimmt werden kann. Dazu wurden drei beliebige Bluetooth Sender in der Testumgebung ausgewählt und ihre Signalstärken entlang des dazugehörigen Korridors in einheitlichen Abständen gemessen. Insgesamt 17 verschiedene Messungen in Abständen von 1,2 Metern werden für die Untersuchung jeden der drei Sender herangezogen. In der Abbildung 41, Abbildung 42 und Abbildung 43 ist der Signalstärkenverlauf des jeweiligen Senders dargestellt.

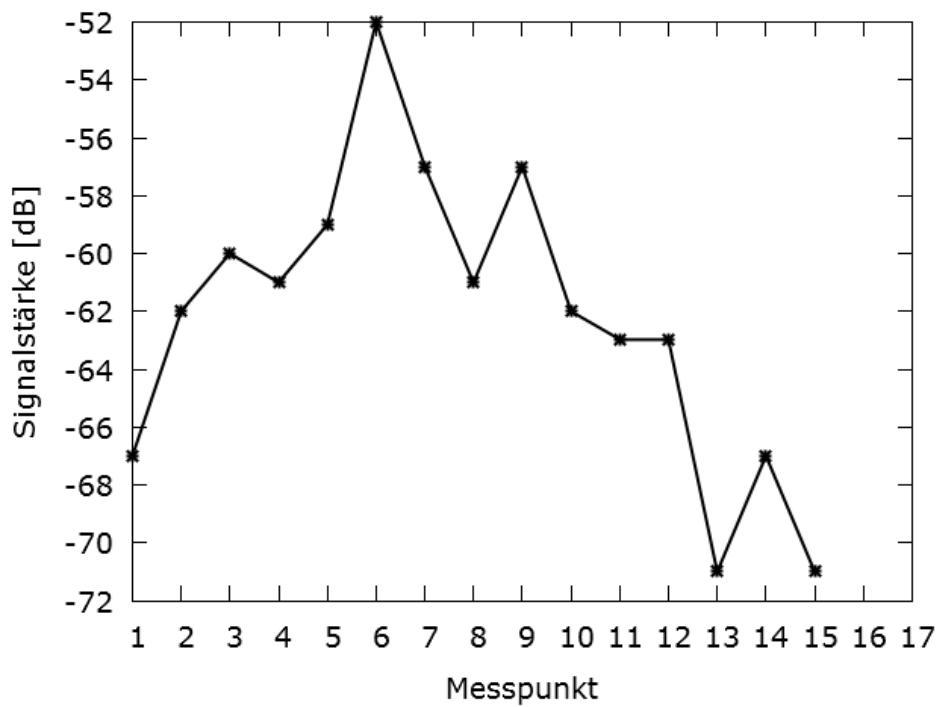


Abbildung 41: Signalstärkenverlauf des Bluetooth Senders mit der Adresse 00:19:15:49:ED:A1

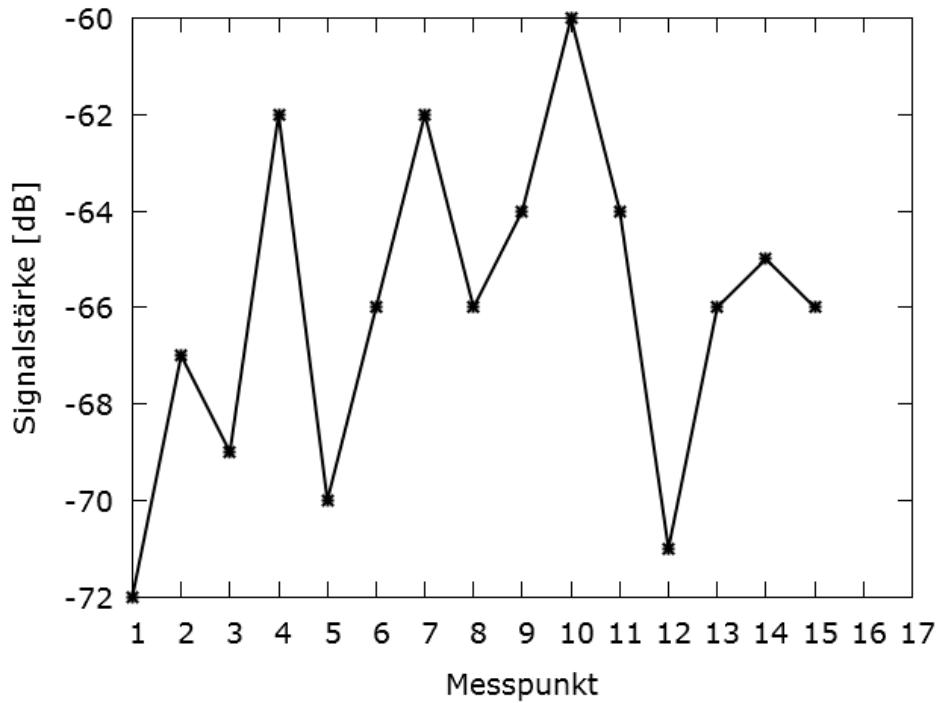


Abbildung 42: Signalstärkenverlauf des Bluetooth Senders mit der Adresse 00:02:72:23:FF:83

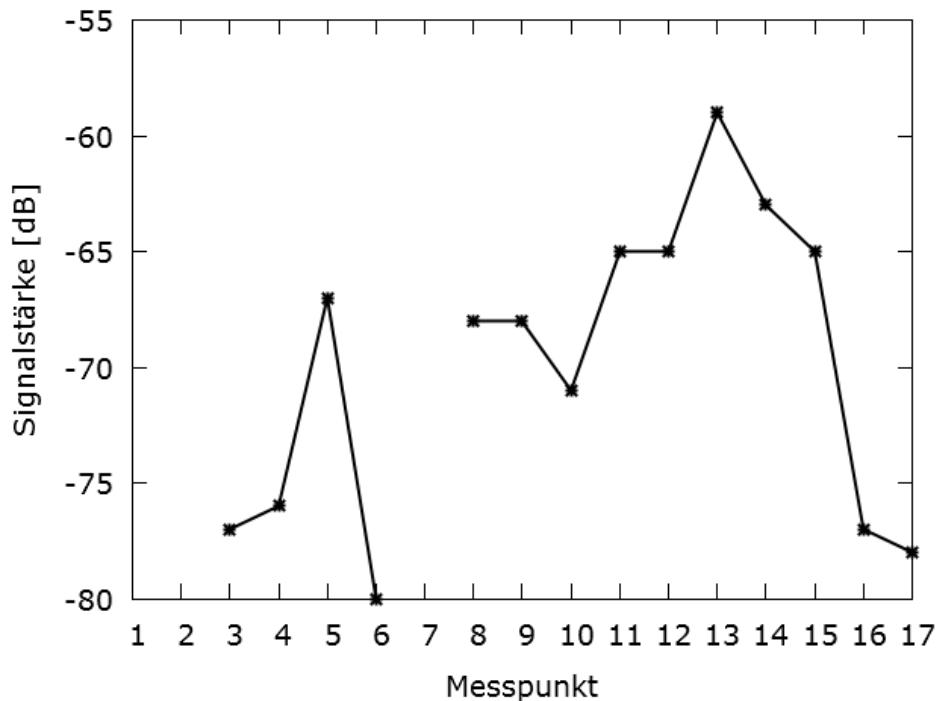


Abbildung 43: signalstärkenverlauf des Senders mit der Adresse 00:02:72:23:FF:74

Der Sender aus Abbildung 41 weist ab dem Messpunkt 2 bis Messpunkt 12 Signalstärken die über dem Schwellwert von -64 dB liegen. Das bedeutet über einen Abstand von 13,2 Meter misst das Testgerät hohe Signalstärken dieses Senders und wird durch das Positionierungssystem in die Mitte dieses Raumes im Korridor positioniert. Nimmt man die Aufnahmepositionen sowie die Größe bzw. Länge des Raumes in Betracht in dem sich der Sender befindet und in diesem Fall 9,56 Meter beträgt, bedeutet dies, dass das Positionierungssystem mit einem Fehler von maximal 1,95 Meter diesen Raum auch richtig bestimmen kann.

Der Sender in Abbildung 42 zeigt ein stärker schwankendes Verhalten seiner Signalstärken als im vorherigen Beispiel. Dieser Sender befindet sich im Zimmer mit einer Größe von 4,68 Meter. und weist unregelmäßig über verschiedene Messpunkte eine Signalstärke oberhalb des Schwellwerts auf. Die Länge der Strecke über die hohe Signalwerte gemessen werden können beträgt 13,2 Meter wobei der höchste Wert von -60 dB genau vor dem Raum gemessen wird in dem auch der Sender stationiert ist. In diesem Fall bestimmt das Positionierungssystem mit einem maximalen Fehler von 4,68 Meter den richtigen Raum.

Im letzten Beispiel zeigt Abbildung 43 den Signalstärkenverlauf eines Senders der auch in einem Zimmer mit der Größe von 4,68 Meter stationiert ist. Dieser Sender besitzt in fünf Messpunkten eine Signalstärke die größer oder gleich dem Schwellwert ist was einer Strecke von 6m entspricht die hohe signalstärken aufweist. Hier bestimmt das Positionierungssystem den richtigen Raum mit einem maximalen Fehler von 1,17 Meter.

Die Abbildungen zeigen, dass sich Bluetooth Sender unterscheiden können bezüglich der Reichweite und Qualität ihrer Signalstärken. Sie haben allerdings gegenüber WLAN einen Vorteil: durch die bekannte Position der Sender und die etwas kleinere Reichweite können zumindest über den Eingrenzungsbereich genauere Angaben gemacht werden.

Wie die Beispiele zeigen, kann die Positionierung mit Bluetooth mit einer Genauigkeit von wenigen Metern auf einen spezifischen Raum festgelegt werden. Das ist in der Testumgebung dieser Studienarbeit jedoch auch ein gutes Maß.

### 6.2.3 Beschleunigungssensor

Die Evaluierung des Beschleunigungssensors und Kompasses erfolget für zwei verschiedene Bewegungsprofile. Das Profil Nord-Ost enthält 15 durchgeführte Schritte in die Himmelsrichtung Norden und danach 15 Schritte in die Himmelsrichtung Osten. Das zweite Bewegungsprofil Süd-West enthält die gleiche Anzahl durchgeföhrter Schritte jedoch in die Himmelsrichtungen Süd und West. Abbildung 44 zeigt die zwei verschiedenen Bewegungsprofile.

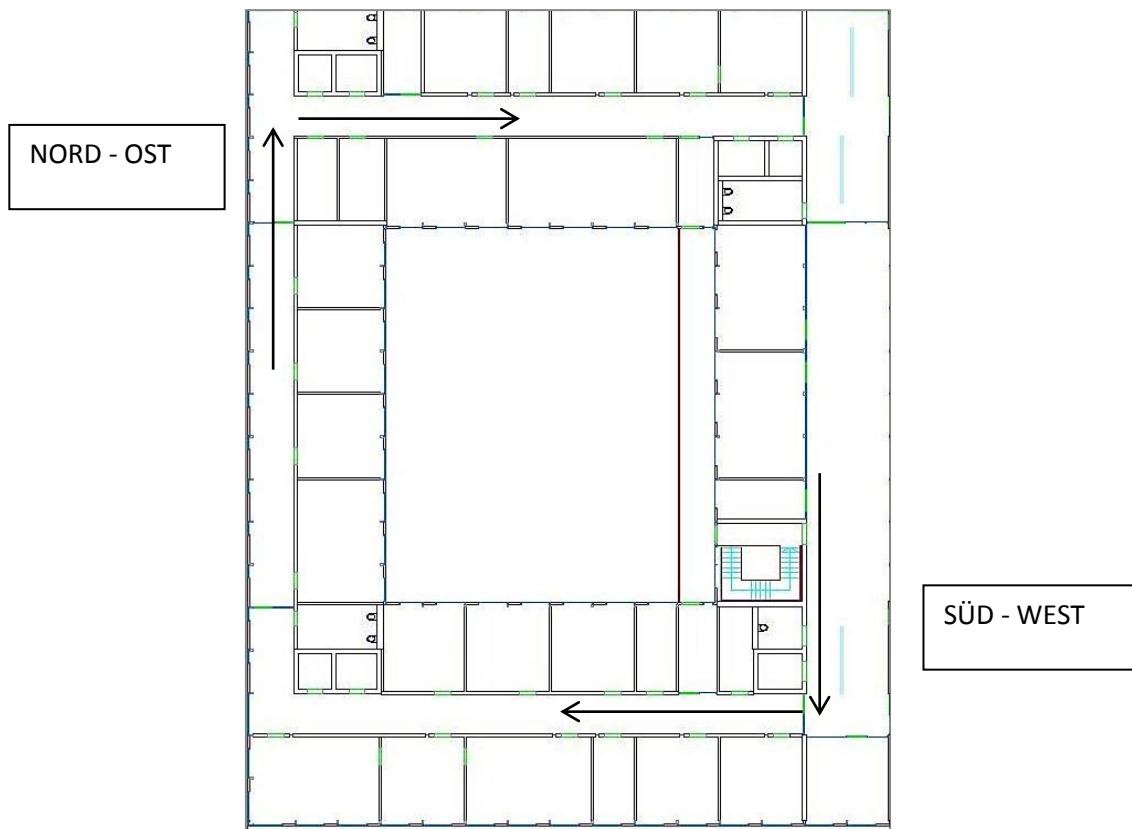


Abbildung 44: Bewegungsprofil

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die jeweiligen Schritte der Bewegungsprofile sowie die vom Kompass berechneten Werte der Ausrichtung.

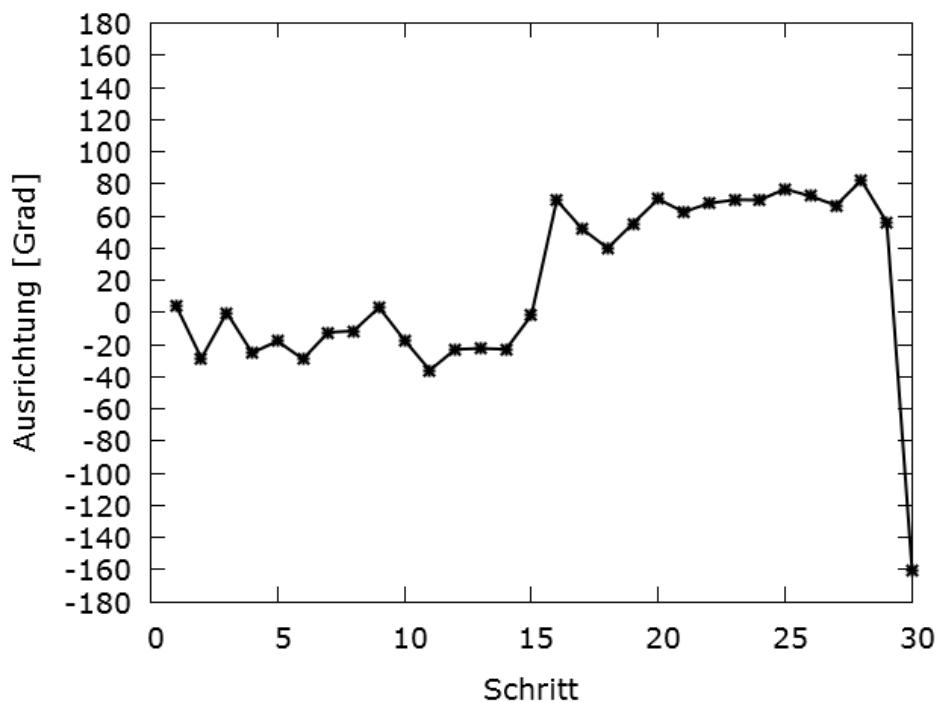


Abbildung 45: Schritte und Ausrichtung Bewegungsprofil Nord-Ost

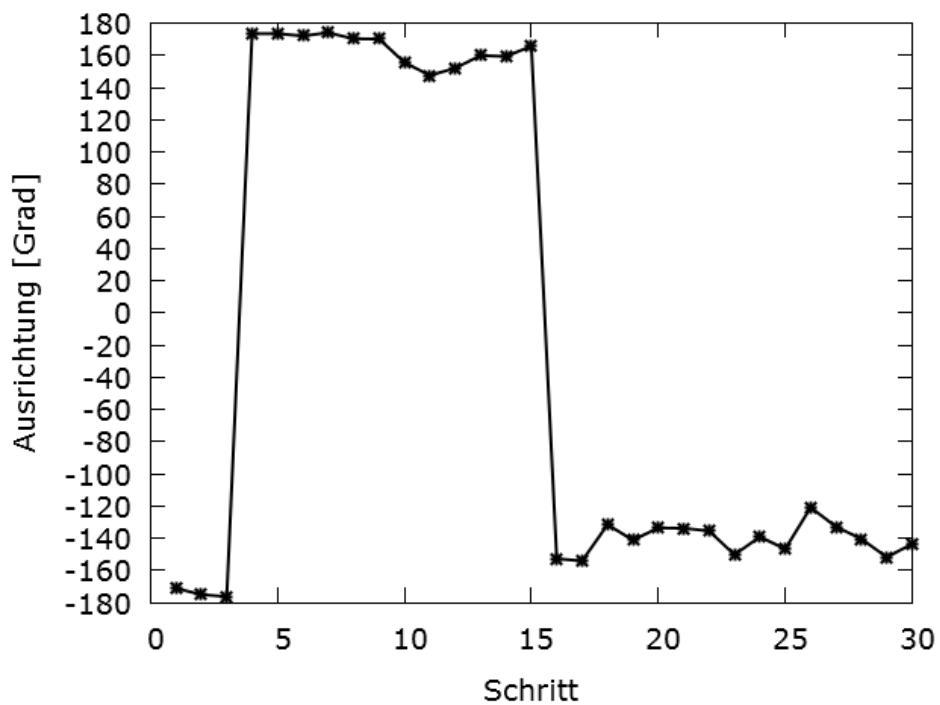


Abbildung 46: Schritte und Ausrichtung Bewegungsprofil Süd-West

Beide Bewegungsprofile weisen eine Schritterkennung von 100% auf denn bei jedem Profil wurden die 30 gemachten Schritte auch als solche erkannt.

Das Bewegungsprofil Nord-Ost in Abbildung 45 weist bei den ersten 15 Schritten Richtung Norden ( $0^\circ$ ) einen Winkel auf der maximal um  $40^\circ$  von  $0^\circ$  abweicht. Die 14 Schritte Richtung Osten ( $90^\circ$ ) besitzen einen Winkel zwischen  $40^\circ$  und  $90^\circ$ . Das bedeutet die Bewegung in Himmelsrichtung Ost hat eine maximale Abweichung von  $50^\circ$ . Der letzte Schritt hat einen Winkel von  $-160^\circ$  was für eine Ausrichtung Süd-West steht und dabei einen vollkommen falschen Wert liefert.

Das Bewegungsprofil Süd-West in Abbildung 46 zeigt für die ersten 15 Schritte in Richtung Süden einen Winkel nahe  $\pm 180^\circ$  (Süd) und einer maximalen Abweichung von  $30^\circ$ . Die folgenden 15 Schritte in Himmelsrichtung West ( $90^\circ$ ) weisen einen Winkel zwischen  $-120^\circ$  und  $-150^\circ$  auf. Ausrichtungswerte für die Bewegung in Richtung Westen sind immer mindestens um  $30^\circ$  falsch und mit einer maximalen Abweichung von  $60^\circ$  auch insgesamt die schlechteste Ausrichtung.

Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen für die zwei oben beschriebenen Bewegungsprofile, wie die durch das Bewegungserkennungsmodul berechnete Position von der tatsächlichen Position abweicht. Dabei sind die einzelnen Aufnahmen immer nach 5 Schritten gemacht worden und nach der dritten Aufnahme findet der jeweilige Richtungswechsel statt.

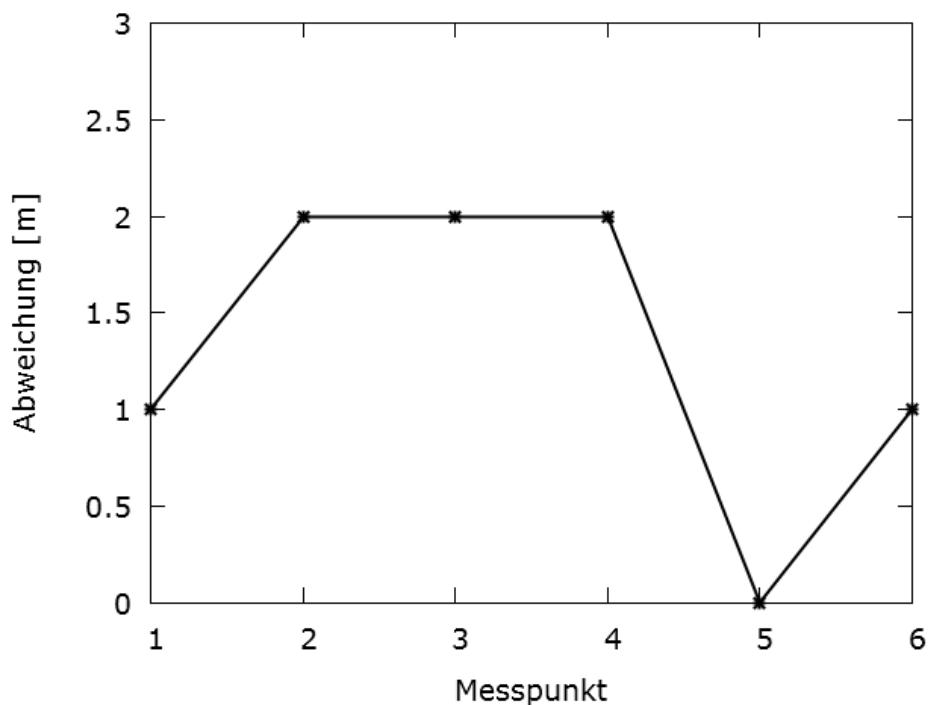
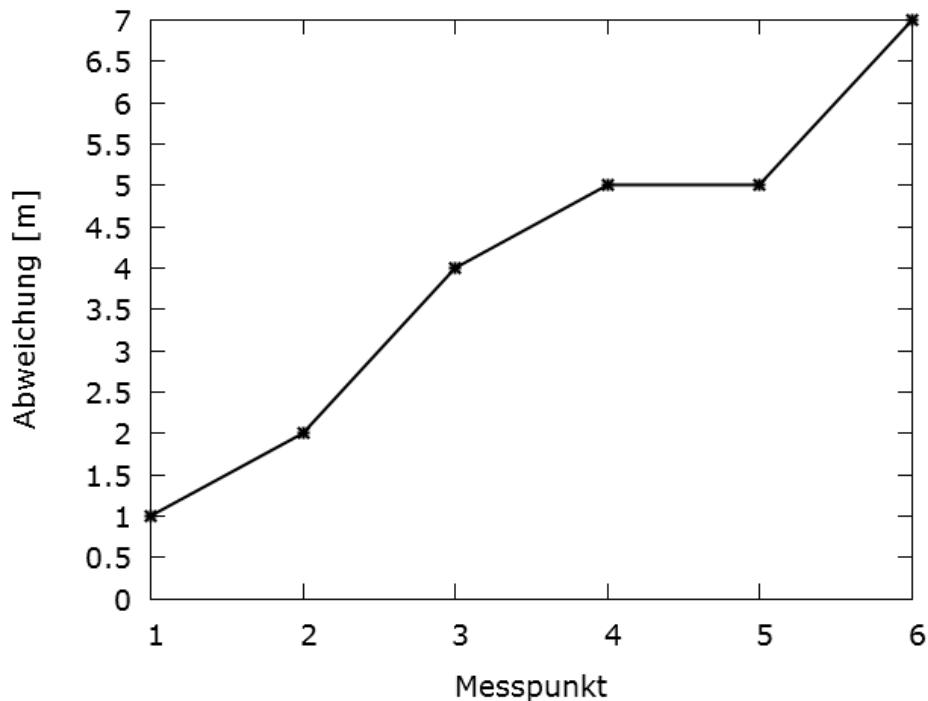


Abbildung 47: Abweichung von der tatsächlichen Position Bewegungsprofil Nord-Ost



**Abbildung 48: Abweichung von der tatsächlichen Position Bewegungsprofil Süd-West**

Im ersten Fall aus Abbildung 47 verhalten sich die Abweichungen ziemlich konstant mit einem maximalen Wert von 2,0 Meter. Nach dem Richtungswechsel wird dies sogar kurzzeitig auf 0 Meter verbessert, danach aber steigt die Abweichung wieder.

Der zweite Fall in Abbildung 48 zeigt jedoch deutlich, dass die Abweichungen mit jeder Aufnahme immer weiter ansteigen können, was die Notwendigkeit der Synchronisation dieses Sensors bekräftigt.

#### 6.2.4 Kombinierte Positionsbestimmung

Die kombinierte Positionsbestimmung nutzt WLAN und Bluetooth Informationen sowie Beschleunigungssensor und Kompass um eine Position des Testgeräts und seines Nutzers im Testgebäude zu bestimmen. Die letzten Abschnitte haben gezeigt, dass WLAN mit dem gewichteten kNN die besten Ergebnisse liefert wenn  $k = 4$  gilt. Zur Untersuchung der Genauigkeiten einer kombinierten Berechnung der Position wurden in allen Korridoren der Testumgebung 16 verschiedene Aufnahmen der Infrastruktur getätigt und zusammen mit der tatsächlichen Position zur Auswertung gespeichert.

Ziel dieser Studienarbeit war die Verbesserung der auf WLAN basierenden Verfahren durch einen Multisensoransatz. Als Vergleich wird hier deshalb das Positionierungsverfahren herangezogen, das ausschließlich WLAN-Sensorinformationen verwendet. Die nachfolgenden drei Abbildungen stellen den Maximalen Fehler, den Mittleren Fehler sowie die Standardabweichung der zwei verschiedenen Berechnungen dar.

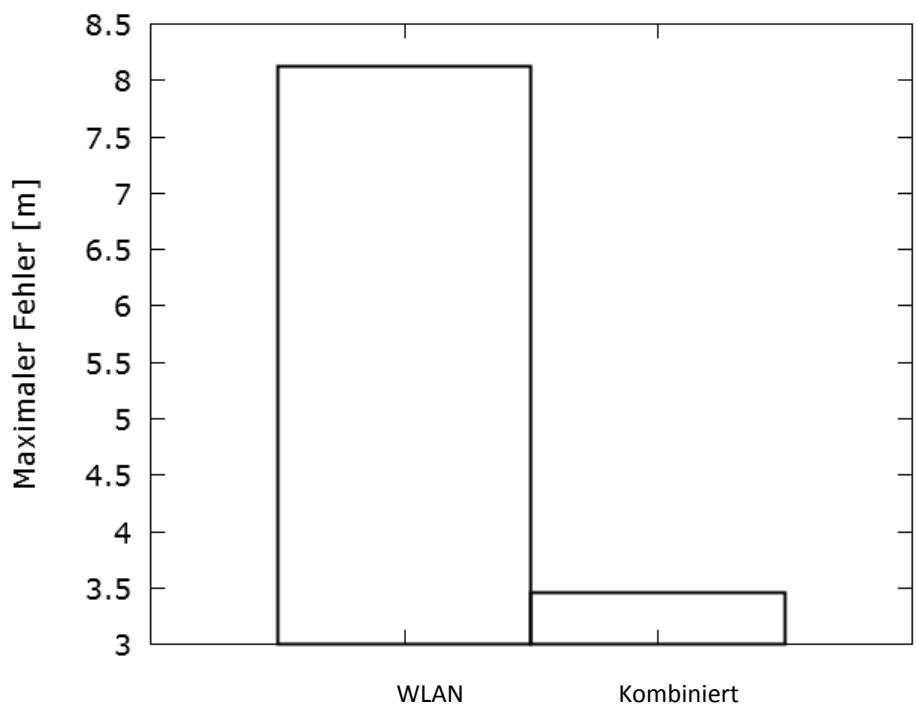


Abbildung 49: Maximaler Fehler bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung

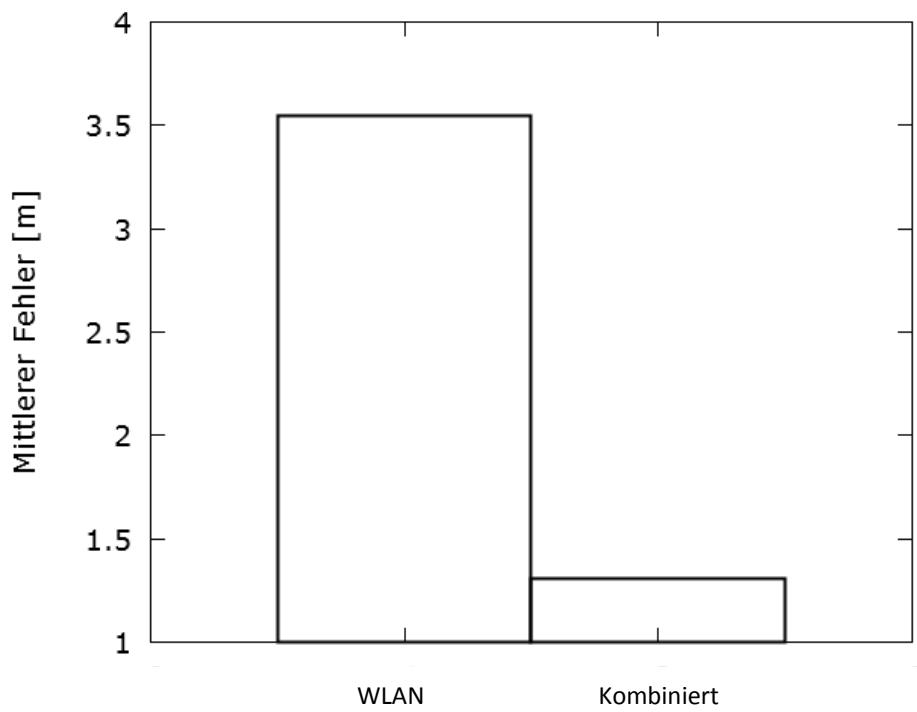
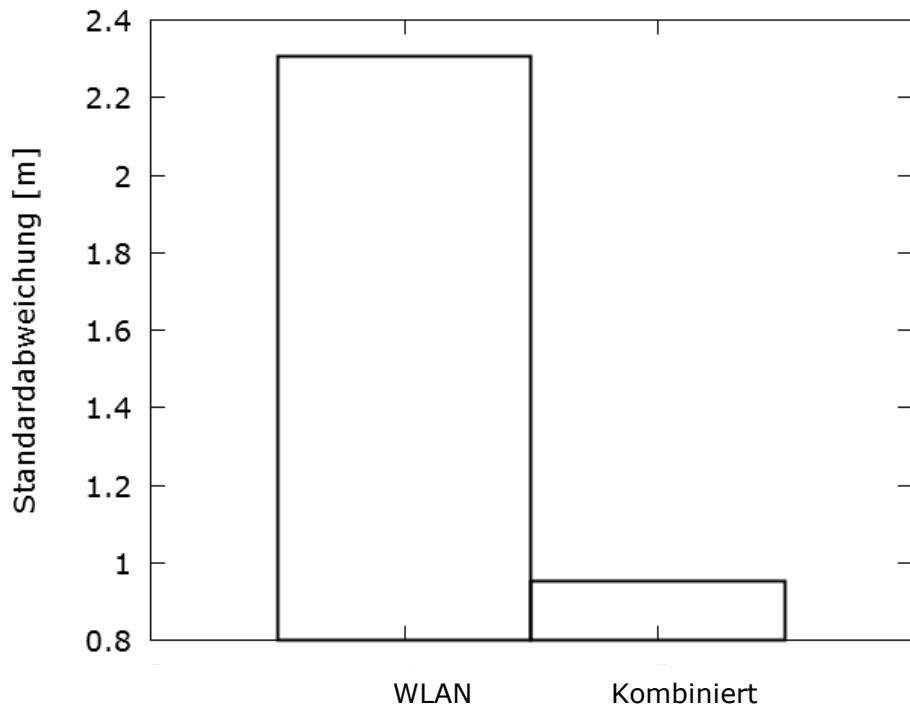


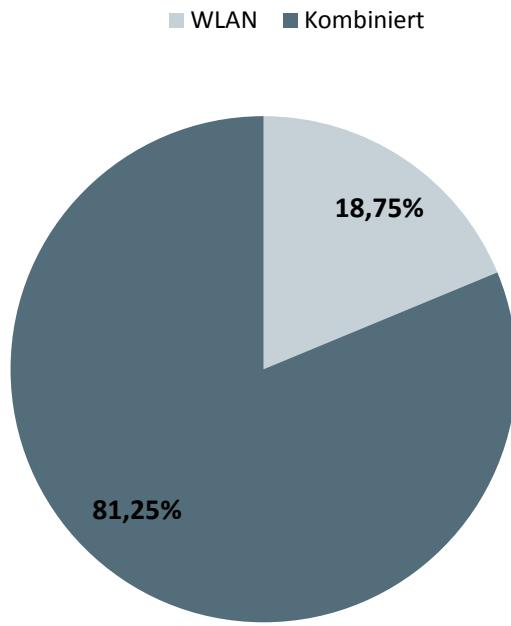
Abbildung 50: Mittlerer Fehler bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung



**Abbildung 51: Standardabweichung bei WLAN und kombinierter Positionsbestimmung**

Die Abbildung 49 zeigt für den gewichteten kNN mit  $k = 4$  basierend auf WLAN einen maximalen Fehler von 8,2 Meter. Dieser Fehler ist für die kombinierte Positionsbestimmung deutlich niedriger und beträgt 3,4 Meter.

Bei dem Mittleren Fehler in Abbildung 50 und der Standardabweichung in Abbildung 51 ist der Vorteil der Kombination der Sensoren auch deutlich zu erkennen. Während der kNN von WLAN einen Mittleren Fehler von 3,6 Meter und eine Standardabweichung von 2,3 Meter aufweist, hat die Kombination einen Mittleren Fehler von 1,3 Meter und eine relativ kleine Standardabweichung von 0,9 Meter. Im direkten Vergleich ist mit dem kombinierten Verfahren eine deutliche Verbesserung des auf WLAN basierten kNN möglich.



**Abbildung 52: Verbesserung der Genauigkeit durch Kombination von Sensoren**

Abbildung 52 stellt prozentual die Verbesserungsquote durch das kombinierte Verfahren dar. In 81,25% der 16 Testfälle konnte mit Hilfe der kombinierten Positionsbestimmung ein besseres Ergebnis erzielt werden. Lediglich in 18,75% war der gewichtete kNN auf den WLAN Daten besser.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination verschiedener Infrastrukturen bzw. Sensoren bietet eine gute Möglichkeit, die Schwächen einzelner Sensoren zu kompensieren und die Berechnungen der Position innerhalb vom Gebäude weiter zu verfeinern. WLAN bietet sich wegen seiner bereits existierenden Infrastruktur in den meisten öffentlichen Gebäuden an. Doch auch WLAN Signale unterliegen verschiedenen Störeinflüssen. Deshalb kann eine explizit für Positionierungszwecke aufgebaute und ergänzende Infrastruktur wie zum Beispiel Bluetooth die Bestimmung der Position erheblich verbessern.

WLAN und Bluetooth Infrastrukturen bieten eine kostengünstige und einfache Variante, Innenraumpositionierungen zu ermöglichen. Jedoch sollte klar sein, dass bei diesen Methoden unabhängig von der Art der Anwendung mit einem Fehler im Meterbereich zu rechnen ist. Um genauere Positionen zu erreichen müssen andere Infrastrukturen benutzt werden.

In dieser Studienarbeit wurde ein Innenraum-Positionierungssystem entwickelt, welches durch die WLAN und Bluetooth Infrastruktur im Gebäude in der Lage ist, Positionen innerhalb dieser Umgebung zu bestimmen. Durch die Zusammenführung der Berechnungen einer Position mit Daten von beiden Infrastrukturen, sowie Informationen des im Smartphone integrierten Beschleunigungssensors und Kompasses werden genauere Positions berechnungen ermöglicht.

Das Positionierungssystem in dieser Studienarbeit nutzt für die WLAN Positionierung die Fingerprinting Methode mit MAC-Adressen und Signalstärken verfügbarer Access Points als Fingerprints. Die Berechnung der Position aus dem Vergleich zwischen den Referenzpunkten aus der Offline-Phase und einem Online-Punkt erfolgt mittels eines gewichteten kNN-Verfahrens. Die  $k$  Nachbarn werden durch Euklidische Distanzen der Signalstärken bestimmt. Es wurde festgestellt, dass beim Vergleich fehlende Mac-Adressen nicht ignoriert werden können. Um akzeptable Genauigkeiten zu erreichen, muss bei der Bildung der Euklidischen Distanz zu einem Referenzpunkt für jede im Referenzpunkt nicht enthaltene Adresse ein minimaler Wert von -100 dB angenommen werden. Für  $k=4$  wurde das beste Ergebnis erreicht. Ferner ergaben die Untersuchungen, dass die Betrachtung von Adressen, die im Referenzpunkt jedoch nicht im Online-Punkt vorhanden sind, für manche  $k$  einen kleineren maximalen Fehler produzieren, jedoch verhält sich das kNN-Verfahren mit  $k = 4$  ohne explizite Berücksichtigung dieser Adressen im Mittel besser. Deshalb wurde in der Studienarbeit nur dieser Ansatz weiter berücksichtigt.

Die Positionierung mit Bluetooth erfolgt durch Berücksichtigung hoher Signalstärken bekannter Sender. Untersuchungen der Reproduzierbarkeit von Bluetooth-Signalen ergaben, dass diese starken Schwankungen unterliegen, was sie für Algorithmen, die auf Signalstärken der Sender beruhen, unzuverlässig macht. Ferner wurde festgestellt, dass Signalstärken eines Senders, die höher oder gleich einem Schwellwert von -64 dB sind, mit wenig Abweichung nur vor dem Raum gemessen werden können, in dem sich dieser Sender befindet. Die Position wird bei hoher Signalstärke daher als der Raum angegeben, in dem der Sender mit dieser Signalstärke stationiert ist.

Die WLAN- und Bluetooth-Positionierung wurde anschließend zusammen mit der Positionsbestimmung durch den Beschleunigungssensor und Kompass des Smartphones in einem Kombinationsverfahren ausgewertet, um bessere Genauigkeiten zu erreichen. Der Beschleunigungssensor ist dafür zuständig, die Bewegung bzw. die Schritte des Nutzers zu erkennen und der Kompass gibt dieser Bewegung eine Ausrichtung.

Die Erkennung von Schritten funktioniert mit einer Erkennungsrate von 100%. Die vom Kompass bestimmte Ausrichtung der Schritte variiert jedoch meistens um einige Grad von der tatsächlichen Ausrichtung. Mittels der groben Abschätzung der Bewegung konnte jedoch eine deutliche Verbesserung des Gesamtverfahrens erreicht werden. Mittels Synchronisierung wird das Abdriften der Position durch aufsummieren von Fehlern verhindert.

Bei der kombinierten Positionsbestimmung wird zunächst überprüft, ob hohe Signalwerte eines Bluetooth Senders vorhanden sind. Ist dies der Fall, so ist die kombinierte Position durch das Bluetooth-Verfahren festgelegt. Andernfalls wird überprüft, ob der Beschleunigungssensor und der Kompass eine Position liefern, die im Einklang mit den minimalen Euklidischen Distanzen ist. Erfolgt die Überprüfung positiv, so wird anhand der Positionsabschätzung eine neue Gewichtung der  $k$  Nachbarn durchgeführt. Dies führt dazu, dass Mehrdeutigkeiten und unscharfe Ergebnisse der WLAN-Positionierung verbessert werden.

Der Fehler bei der Berechnung der Ausrichtung durch den Kompass führt dazu, dass die Position der Bewegungserkennung abdriften kann. Deshalb wurde festgelegt, dass in einem bestimmten Zeitintervall eine Synchronisation mit der kombinierten Positionsbestimmung stattfinden muss. Dadurch entsteht eine Kopplung der verschiedenen Sensoren: Die Bewegungserkennung verbessert die WLAN-Positionierung, indem beispielsweise falsche Richtungsänderungen oder weit entfernte Punkte ausgeschlossen werden. Die WLAN-Positionierung schränkt durch die Interpolation des kNN-Verfahrens die Bewegungserkennung auf den Bereich innerhalb der Referenzpunkte ein. Durch die Kombination verschiedener Sensoren konnte im Gegensatz zu der Positionierung mit dem gewichteten kNN auf WLAN eine Verbesserung der Genauigkeiten in 81,25% der Testfälle erreicht werden.

Mit dem entwickelten System ist eine robuste Positionsbestimmung in Gebäuden bereits möglich. Zukünftige Systeme müssen jedoch einige zusätzliche Aspekte berücksichtigen.

Das entwickelte System berücksichtigt nicht die Heterogenität der Infrastruktur. Insbesondere die Vielfalt der Mobiltelefone muss für ein allgemein nutzbares System betrachtet werden. Ziel dabei ist die Vergleichbarkeit von Fingerprints verschiedener Geräte sicherzustellen.

Die bei der WLAN-Positionierung benutzte Fingerprinting-Methode besitzt einen großen Nachteil: sie erfordert einen enormen Aufwand bei der Sammlung von Referenzdaten. Jede Veränderung der Infrastruktur muss berücksichtigt werden und führt zu einer neuen Aufnahme von Referenzdaten. Fingerprinting-Methoden hängen zudem stark von der Anzahl der Referenzpunkte, sowie der Qualität der Messungen ab. Adaptive Algorithmen zur Bestimmung der Referenzdaten sind für einen Dauerbetrieb notwendig. Andernfalls werden Veränderungen innerhalb der Umgebung nicht erfasst und führen zu falschen Positionsbestimmungen.

Bei der Positionierung mittels Bluetooth ist es wichtig, die Positionen der Sender so zu bestimmen, dass eine möglichst gute Abdeckung der Umgebung erreicht werden kann. Verfahren zur Ermittlung bestmöglichster Abdeckungen müssen noch erforscht werden.

Die Bewegungserkennung erfolgt relativ zuverlässig. Jedoch unterliegt sie der Annahme, dass die Bewegung für alle Nutzer gleich erfolgt.

Die festgelegten Parameter müssen für andere Nutzer eventuell angepasst werden. Adaptive Verfahren, die sich automatisch an den jeweiligen Nutzer anpassen, sind zu bevorzugen. Ferner gilt es die Bewegungserkennung robuster zu machen, so dass sie beispielsweise auch funktioniert, wenn das Mobiltelefon in der Tasche getragen wird.

Der Energieverbrauch von Positionierungssystemen wurde in dieser Studienarbeit nicht betrachtet. Die kontinuierliche Auswertung von verschiedenen Sensoren führt zu einem erhöhten Energieverbrauch. Die Kommunikation mit der Referenzdatenbank führt zu zusätzlichem Verbrauch. Um Positionierungssysteme alltagstauglich zu bekommen, muss der Energieverbrauch berücksichtigt und gegebenenfalls durch optimierte Verfahren reduziert werden.

Innenraumpositionierungen werden auch in Zukunft ein interessantes Thema bleiben.

## Literaturverzeichnis

- [1] Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu Hui Liu, "Survey of Wirelee Indoor Positioning Techniques and Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS-PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS, VOL. 37, NO. 6, NOVEMBER 2007.*
- [2] Harald Weinschrott, Frank Dürr, Kurt Rothermel Patrick Baier, "MapCorrect: Automatic Correction and Validation of Road Maps Using Public Sensing," in *36th IEEE Conference on Local Computer Networks*, Bonn, Germany, 2011, pp. 58-66.
- [3] Frank Dürr, Kurt Rothermel Patrick Baier, "PSense: Reducing Energy Consumption in Public Sensing Systems," in *26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Fukuoka, 2012.
- [4] Jie Chen, Wei Guo, and K.J. Ray Liu Guolin Sun, "Signal Processing Techniques in Network Aided Positioning," *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, JULY 2005.
- [5] Markus Schauch, Syuzanna Hakobyan Uwe Grossmann, "RSSI based WLAN Indoor Positioning with Personal Digital Assistents," in *IEEE International Workshop on Intelligent Data Aquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application*, Dortmund, September 2007.
- [6] Richard E. Neapolitan, *Learning Bayesian Networks*. Chicago, Illinois, USA: Prentice Hall, 2003.
- [7] Venkata N. Padmanabhan Paramvir Bahl, *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System.*, 2000.
- [8] Stephan Kopf, Thomas Haenselmann, Christian Lubberger, Wolfgang Effelsberg Thomas King, *COMPASS: A Probabilistic Indoor Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses*. Mannheim, Germany, 2006.
- [9] Martin Werner Moritz Kessel, "SMARTPOS: Accurate and Precise Indoor Positioning on Mobile Phones," in *MOBILITY 2011: The first International Conference on Mobile Services, Resources, and Users*, 2011.
- [10] Carlos Serodio, Luis Coutinho, Luis Reigoto, Joao Matias Pedro Maestre, *Hybrid technique for Fingerprinting using IEEE802.11 Wireless Networks.*, 2011.
- [11] Dovydas Sabonis, Christian S. Jensen, Hua Lu Artur Baniukevic, "Improving Wi-Fi Based Indoor Positioning Using Bluetooth Add-Ones," in *12th IEEE International Conference on Mobile Data*, Denmark, 2011.
- [12] Jong Weon Lee Van Vinh Nguyen, "Self-positioning System for Indoor Navigation on Mobile Phones," in *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2012.
- [13] Ken Le, Pradeep Vaghela, Alaya Kollu, Karthik Dantu, Sameera Poduri, Gaurav S. Sukhatame Avinash Parnandi, *Coarse In-building Localization with Smartphones.*, 2009.

[14] Apache 2.0. Sensor Event. [Online].

<http://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorEvent.html>

[15] Donald Shepard, "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data," in *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*, 1968, pp. 517-524.

[16] Apache 2.0. Sensor Manager. [Online].

<http://developer.android.com/reference/android/hardware/SensorManager.html>

## **Erklärung**

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

Stuttgart, den 23.10.2012