

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Evaluierung von Messgeräten zur Detektion von Fußgängerströmen

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: Michael Rostek



1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuer: Daniel Biedermann, M.Sc.

Ausgabedatum: 09. September 2016

Abgabedatum: 17. April 2017

Abstract

This paper introduces various methods of data acquisition and analysis, which are necessary for an examination of a simulated stream of people. Hereby the advantages and disadvantages of those methods are presented in detail.

The primary focus introduced is the method of WiFi-tracking. The chair for computer-aided modelling of the Technical University of Munich possesses several wireless network trackers, which are tested within the framework of this work for experimental purposes.

The WLAN-trackers are based on a Raspberry Pi (RPI), which is being evaluated along this paper. Within different field studies, the achievable accuracy of a pedestrian analysis using the WiFi-tracking is being evaluated.

Finally, the paper examines, how accurately a position determination using the specific calculation method trilateration is possible.

In the preliminary stage, measurements were taken to test the functionality and accuracy of the WLAN-trackers. The analysis results show, that for the position determination using WLAN no accuracy in the lower metre range can be achieved. This can be explained by strongly fluctuating signal strengths of the mobile devices.

The determination of position through trilateration is calculated with data, which was collected on a large Christmas market in Munich. In this field study data was collected across several days. The inaccuracies of the calculations are higher compared to the preliminary measurements, as the proportion of disruptive factors is significantly higher as well. To improve the inaccuracy the mean can be used for the calculations and the approach principle of scaling circles for the trilateration.

For major events with masses of people this exact method cannot be used to determine the specific localisation of a person.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Methoden der Datenaufnahme und Auswertung vorgestellt, die zur Überprüfung der Simulationen von Personenströmen benötigt werden. Hierbei werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden herausgearbeitet.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Methode des WiFi-Trackings. Der Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung der Technischen Universität München besitzt eine Anzahl WLAN-Tracker, die im Rahmen dieser Arbeit zu Versuchszwecken getestet werden.

Die WLAN-Tracker basieren auf einem Raspberry Pi (RPI), der im Rahmen dieser Arbeit evaluiert wird. Es wird in verschiedenen Feldstudien untersucht, welche Genauigkeit bei einer Fußgängeranalyse durch WiFi-Tracking erzielt werden kann.

Abschließend wird geprüft, wie genau eine Positionsbestimmung durch das Berechnungsverfahren der Trilateration möglich ist.

Dazu wurden im Vorfeld Messungen durchgeführt, um die Funktionalität und Genauigkeit der WiFi-Tracker zu testen. Das Ergebnis der Auswertungen zeigt, dass bei der Positionsbestimmung durch WLAN keine Genauigkeit im unteren Meterbereich erreicht werden kann. Gründe hierfür sind stark schwankende Signalstärken der Mobilgeräte.

Die Positionsbestimmung durch Trilateration wird mit Daten berechnet, die auf einem großen Weihnachtsmarkt in München aufgenommen wurden. Bei diesem Feldversuch wurden an mehreren Tagen Daten gespeichert. Die Ungenauigkeiten der Berechnungen sind im Vergleich zu den Messungen im Vorfeld größer, da auch der Anteil an Störfaktoren deutlich höher ist. Durch die Berechnung anhand von Mittelwerten und durch den Ansatz der Skalierung von Kreisen bei der Trilateration, wird versucht die Genauigkeit zu verbessern.

Bei Großveranstaltungen mit großen Menschenmassen kann das Verfahren in dieser Form nicht zu einer genauen Lokalisierung von Personen verwendet werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einführung und Motivation	11
1.1 Ziel dieser Arbeit	11
1.2 Aufbau der Arbeit	11
1.3 Einführung	12
2 Vergleich der Lokalisierungsmethoden	14
2.1 GPS	14
2.2 Infrarot	17
2.3 Ultraschall	18
2.4 Bluetooth	19
2.5 WLAN	19
2.6 Video	21
2.7 Händisch	22
2.8 Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden	22
3 Lokalisationsverfahren	24
3.1 Trilateration	24
3.2 Triangulation	25
3.3 CoO (Cell of Origin)	26
3.4 RSS (Received Signal Strength) und LF (Location Fingerprinting)	27
3.5 AoA (Angle of Arrival)	30
3.6 ToA (Time of Arrival)	31
3.7 TDoA (Time Difference of Arrival)	32
3.8 Anwendbarkeit beim WLAN-Tracking	33
4 Rechtliche Grundlagen	34

5	Feldstudie - Evaluation von Messgeräten zur Detektion von Fußgängerströmen	36
5.1	Ziele und Erwartungen an die Feldstudie.....	36
5.2	Technische Vorbereitung der Aufnahmen.....	36
5.3	Vorversuche.....	38
5.3.1	Identifizierung der Testgeräte (Handy).....	38
5.3.2	Sendehäufigkeit der Testgeräte	39
5.3.3	Dämpfung gegenüber Entfernung.....	41
5.3.4	Signalschwankung über die Zeit	45
5.3.5	Genauigkeit der GPS-Messung	48
5.4	Feldversuch ‚Weihnachtsmarkt‘ 2016	49
5.4.1	Schwabinger Weihnachtsmarkt 2016 an der Münchner Freiheit.....	49
5.4.2	Platzierung der WiFi-Boxen	51
5.4.3	Durchführung/Ablauf	53
5.4.4	Auswertung	54
6	Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	69
	Anhang	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Trilateration GPS 3D (GPS-3D-trilateration n.d.)	15
Abbildung 2 Multipathing (Gleim 2012).....	16
Abbildung 3 GPS Differential Correction (gps-differential-correction n.d.)	17
Abbildung 4 Elektromagnetisches Spektrum (Electromagnetic_spectrum_c.svg n.d.).....	18
Abbildung 5 Leistungsdichte Freiraumdämpfung (Leistungsdichte n.d.)	20
Abbildung 6 Lokalisierungsmethoden (Novrianto 2012)	24
Abbildung 7 Trilateration (Novrianto 2012)	25
Abbildung 8 Triangulation (Novrianto 2012)	26
Abbildung 9 CoO (Frequency_reuse n.d.)	27
Abbildung 10 RSS (Novrianto 2012).....	28
Abbildung 11 Fingerprinting Map (Köppe 2014)	29
Abbildung 12 AoA (Novrianto 2012)	30
Abbildung 13 ToA mit drei BS (Novrianto 2012)	31
Abbildung 14 TDoA (Novrianto 2012).....	32
Abbildung 15 Hyperbeldarstellung des TDoA-Verfahrens (Novrianto 2012).....	33
Abbildung 16 Raspberry Pi	37
Abbildung 17 Raspberry Pi	37
Abbildung 18 Raspberry Pi in der Box.....	38
Abbildung 19 Beispiel Sendehäufigkeit Probe Request mit App.....	40
Abbildung 20 Skizze Versuchsaufbau der Signalstärke über die Entfernung	42
Abbildung 21 Signalstärke über die Entfernung.....	43
Abbildung 22 Freiraumdämpfung (FSPL_for_common_802.11_frequency_bands) .	44
Abbildung 23 Umrechnung dB in Meter	45
Abbildung 24 Skizze Versuchsaufbau der Signalstärke über die Zeit.....	46
Abbildung 25 Signalstärke über die Zeit	47
Abbildung 26 GL-770 professioneller GNSS (GPS + GLONASS) Logger Recorderi	48
Abbildung 27 Weihnachtsmarkt Münchner Freiheit	49

Abbildung 28	Budenplan der Veranstaltungsleitung (Schwabinger Weihnachtsmarkt an der Münchner Freiheit)	50
Abbildung 29	OpenStreetMap Münchner Freiheit (Openstreetmap).....	51
Abbildung 30	Budenplan mit RPi-Positionen (Schwabinger Weihnachtsmarkt an der Münchner Freiheit)	52
Abbildung 31	Beispiel Platzierung WiFi-Boxen (in schwarzer Plastiktüte)	53
Abbildung 32	Beispielbild für Referenzmessungen Daniel Biedermann	56
Abbildung 33	Beispielbild für Referenzmessungen Daniel Biedermann	57
Abbildung 34	Karte mit Referenzpunkten und Basisstationen	58
Abbildung 35	Budenplan nicht maßstabsgetreu	58
Abbildung 36	Skizze Trilateration	60
Abbildung 37	Trilateration Ref. 11	61
Abbildung 38	Trilateration Ref. 8	61
Abbildung 39	Trilateration Scale-Faktoren.....	63
Abbildung 40	Besucheranzahl Sonntag	65
Abbildung 41	Besucheranzahl Übersicht über alle Messtage	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht Lokalisierungsmethoden (nach Vorbild (Novrianto 2012))	23
--	----

Abkürzungsverzeichnis

AoA	Angle of Arrival
AP	Access Points
App	Applikation Software
BayDSG	Bayerisches Datenschutzgesetz
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BS	Basisstation
CSV	Comma-separated values
dB	Dezibel
DGPS	Differential Global Positioning System
GHz	Gigahertz
GLONASS	Globales Satellitennavigationssystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
ID	Identifikationsnummer
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kBit/s	Kilobit pro Sekunde
kHz	Kilohertz
MAC-Adresse	Media-Access-Control-Adresse
mAh	Milliamperstunden
MHz	Megahertz
MS	Mobile Station
RPi	Raspberry Pi

RSS	Received-Signal-Strength-Verfahren
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
WLAN / WiFi	Wireless-LAN

1 Einführung und Motivation

1.1 Ziel dieser Arbeit

Mit dieser Arbeit sollen die wichtigsten Aufnahme- und Berechnungsmethoden, die zur Fußgängeranalyse benötigt werden, vorgestellt werden. Die Arbeit soll eine Übersicht geben, welche Methoden wann eingesetzt werden und welche Vor- und Nachteile sie mit sich bringen. Es gibt Methoden, die in Außenbereichen geeigneter sind und welche, die in Innenbereichen genauere Ergebnisse liefern. Dazu werden die benötigten Berechnungsverfahren der Trilateration und Triangulation, sowie das Vorgehen bei der Signalauswertung, vorgestellt.

Neben einem Überblick über diese theoretischen Grundlagen wird anhand von Feldstudien versucht, die WLAN-Tracker des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung der Technischen Universität München zu evaluieren. Es soll sowohl die Genauigkeit und Zuverlässigkeit getestet werden, als auch die Anwendbarkeit auf einer Großveranstaltung. Dazu werden die Geräte in verschiedenen Szenarien getestet und es werden Programme entwickelt um die dort aufgenommenen Daten auszuwerten und darzustellen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Der erste Teil dieser Arbeit umfasst die theoretischen Grundlagen der Lokalisation in Personenströmen. Es wird ein Überblick über die verschiedenen Lokalisationsmethoden gegeben. Die Methoden haben Vor- und Nachteile und sind aus diesem Grund für unterschiedliche Anwendungsszenarien geeignet. Diese Unterschiede werden in einer Übersicht dargestellt.

Neben den Lokalisationsmethoden werden auch die Lokalisationsverfahren vorgestellt. Dabei stehen die Arten der Berechnung und die Auswertung der Signale im Vordergrund. Abschließend wird erklärt, warum in dieser Arbeit Entfernungen über die Signalstärke errechnet werden.

Da bei der Datenaufnahme und Lokalisation von Personen das Thema des Datenschutzes und der Privatsphäre eine große Rolle spielt, wird die rechtliche Grundlage vorgestellt, auf der die Datenanalyse in den Feldversuchen dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Im zweiten Teil der Arbeit werden verschiedene Feldversuche beschrieben und ausgewertet. Für die Feldversuche wurde die Methode des WLAN-Trackings ausgewählt. Es werden Versuche gezeigt, welche die Funktionalität und die Genauigkeit der WLAN-Gräte der TU München testen. Es wird getestet, wie konstant die Signalstärke im Lauf der Zeit von den WLAN-Testgeräten aufgezeichnet wird, wenn sich die Umgebungsbedingungen nicht ändern. In einem zweiten Versuch wird die Signalstärke über die Entfernung zwischen Sender und Empfänger gemessen und ausgewertet.

Neben den Versuchen, um die Genauigkeit und Funktionalität der WiFi-Tracker zu messen, wird eine Feldstudie am Schwabinger Weihnachtsmarkt an der München Freiheit beschrieben. Durch Python Programme werden Lokalisationen durch Trilateration berechnet. Anhand von Referenzmessungen wird das ausgewertete Ergebnis auf seine Genauigkeit überprüft und bewertet.

1.3 Einführung

Im Laufe der Zeit haben sich Großveranstaltungen durch den Wandel der Gesellschaft verändert. Sowohl die Zahl der Besucher, die Bedeutung, als auch die Größe der Events nehmen ständig zu. Dies betrifft alle Arten von Großveranstaltungen, von traditionellen bis hin zu großen Sportveranstaltungen (Hitzler 2011).

Dabei wird auch die Gewährleistung der Sicherheit immer schwieriger. Die Loveparade 2010 in Duisburg ist ein negatives Beispiel dafür, dass Menschenmassen sehr schnell außer Kontrolle geraten können. In Duisburg starben fast zwei Duzend Menschen und es gab hunderte Verletzte. Die Schuldfrage bei dieser Katastrophe ist bis zum heutigen Tage rechtlich noch nicht geklärt ("Love Parade: Ermittler Legen Richtern Beschwerde Vor - SPIEGEL ONLINE" 2017).

Doch nicht nur zur Prävention von Massenpaniken oder ähnlichen Katastrophen können Fußgängerströme analysiert werden. Die Analysen können auch in Großstädten mit dichtem Verkehrsaufkommen genutzt werden. Beispielsweise können Architekten

die Untersuchungen schon in der Gestaltungsphase nutzen, oder Anlagebesitzer und Bauunternehmer können Neubauten oder Veränderungen an bestehenden Gebäuden dementsprechend planen. Es gibt eine große Vielfalt an Anwendungsbereichen, für die Fußgängeranalysen von großer Bedeutung sind. Auf Grund der komplexen, chaotischen Art in der sich Fußgängerströme bewegen, können einfache Analysen zur Nachbildung den wirklichen Ereignissen nicht gerecht werden, sondern es werden komplette Simulationen benötigt ("Fussgängerströme — AnyLogic Simulationssoftware" 2017).

Um diese sehr komplexen Simulationen zu erstellen und Fußgängerbewegungen voraussagen zu können, müssen Daten von Menschenströmen erfasst und analysiert werden. Das kann mit verschiedenen Techniken geschehen. Um einen Überblick zu erhalten, werden nachfolgend diese Techniken mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen vorgestellt und anschließend im Rahmen eines Feldversuches die Technik der Datenaufnahme per WLAN getestet.

2 Vergleich der Lokalisierungsmethoden

Mit dem stetigen Wachstum und der fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Kommunikations- und Informationstechnik in den letzten Jahren wächst auch der Bedarf an Möglichkeiten der Lokalisierung immer weiter (Schmidt 2010).

Im Außenbereich wird hierfür das weit verbreitete Global Positioning System (GPS) als Standard zur Lokalisierung verwendet. Alternativ können auch das von den Europäern entwickelte Galileo und das russische GLONASS-System eingesetzt werden (Schmidt 2010).

All diese Methoden bestimmen die Positionierung satellitengestützt. Auf Grund der Signalabschottung in Innenbereichen sind diese Systeme dort jedoch nur sehr ungenau, oder können gar nicht verwendet werden. Für viele Bereiche ist aber die Positionsbestimmung vor allem im Inneren von Gebäuden von großer Bedeutung. Es werden beispielsweise in Krankenhäusern schon heute Systeme auf der Basis von Indoor-Positionierungen benutzt. Diese können den Aufenthaltsort von Geräten oder Patienten bestimmen. Zum Auffinden von Gütern und Waren werden in Lagerhallen von Unternehmen der Logistikbranche ähnliche Systeme verwendet (Schmidt 2010).

Bei der Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden wird oft auf bereits vorhandene Infrastrukturen gesetzt, zum Beispiel bereits vorhandenes WLAN oder GSM Systeme (Schmidt 2010).

Nachfolgend werden hier die wichtigsten bereits existierenden Systeme vorgestellt und verglichen.

2.1 GPS

Das „Global Positioning System“ (GPS) ist, wie einleitend bereits erwähnt, ein satelliten-basiertes Navigationssystem, das seine Daten von 24 Satelliten bekommt, die um den Globus kreisen. Jeder dieser Satelliten sendet ein einzigartiges Signal mit den genauen Koordinaten seines Aufenthaltsortes. Dieses Signal wird in Lichtgeschwin-

digkeit gesendet. Die Signale der Satelliten enthalten einen hoch genauen Zeitstempel, der die Laufzeit eines Signals bestimmt. Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Zeitsynchronität der Satelliten exakt ist. Dafür ist in jedem Satelliten eine Atomuhr eingebaut. Wenn ein GPS-Empfänger auf der Erde dann Signale von mindestens 4 verschiedenen Satelliten empfängt, kann durch Trilateration der genaue Standort des GPS-Empfängers errechnet werden (Gleim 2012).

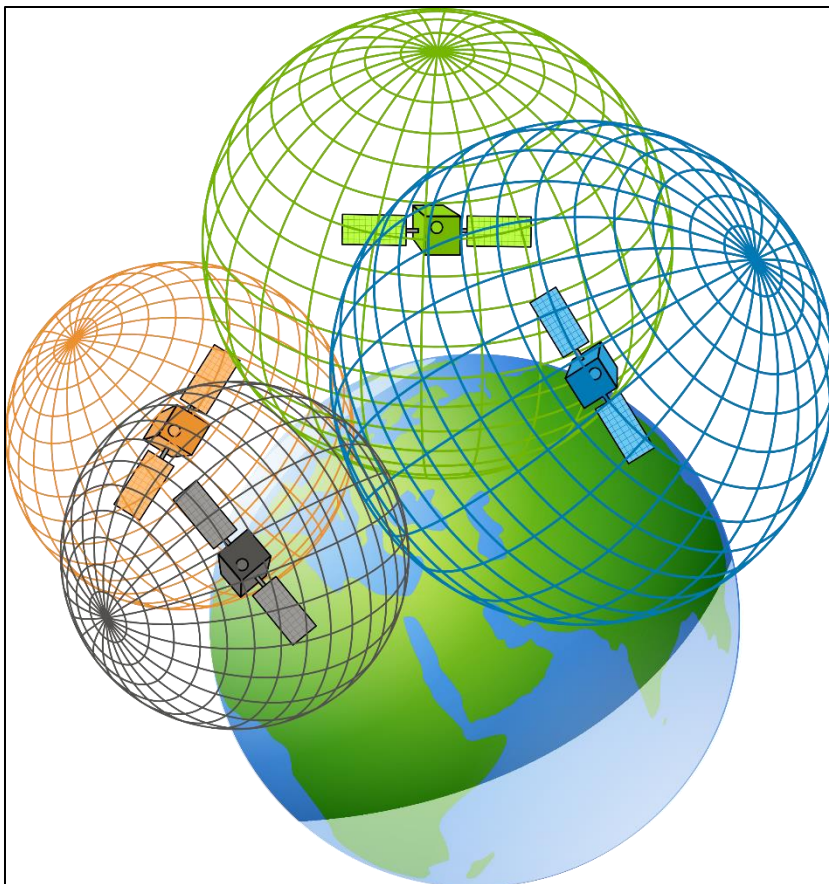


Abbildung 1 Trilateration GPS 3D (GPS-3D-trilateration n.d.)

Drei Satelliten werden benötigt, um den Ort auf der Erde zu bestimmen. Durch den vierten Satelliten kann die Höhe im Raum bestimmt werden. Mit der Verwendung von mehr als 4 Satelliten steigt die Genauigkeit mit jedem weiteren Signal. Üblicherweise werden zur GPS-Positionierung 8 oder mehr Satelliten verwendet. Diese Zahl hängt vom Aufenthaltsort der Satelliten und des Empfängers ab ("Garmin | What Is GPS?" 2017).

Die Positionsbestimmung durch GPS-Daten ist auf offenem Gelände sehr viel besser als in der Stadt. Durch viele hohe Gebäude werden die GPS-Signale gestört oder teilweise ganz unterbrochen. Auch können die Signale von den Gebäuden reflektiert werden. Dadurch werden mehrere gleiche Signale aus unterschiedlichen Richtungen empfangen. Dieser Vorgang nennt sich „Multipathing“ und tritt gleichermaßen innerhalb von Gebäuden auf (Gleim 2012).

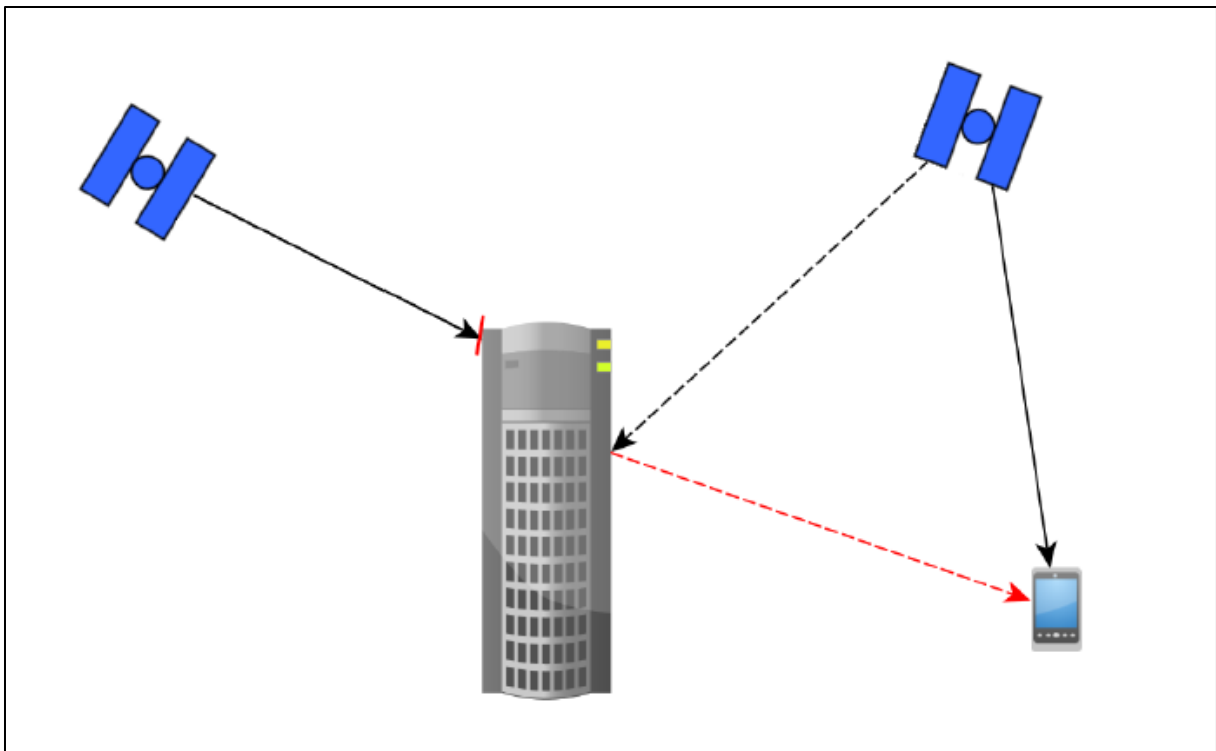


Abbildung 2 Multipathing (Gleim 2012)

Durch diese Störanfälligkeit in der Nähe von Gebäuden liegt die Genauigkeit des GPS bei nur 10 bis 15 Metern. (Badea and Eriksson 2005)

Es wurden jedoch verschiedene Methoden entwickelt um die Genauigkeit, laut Hersteller, auf 1 bis 3 Meter zur verbessern („Garmin | What Is GPS?“ 2017).

Eine dieser Methoden ist das Differential Global Positioning System (DGPS). Beim DGPS werden sogenannte DGPS-Referenzantennen auf der Erde aufgestellt. Von diesen Antennen ist der Standort genau vermessen worden. Diese Antennen bekommen die GPS-Daten ihres Standpunktes genau wie jedes andere GPS-Gerät gesendet. Durch den Vergleich der gespeicherten Position mit der Position, die der Satellit liefert, kann die Abweichung bestimmt werden, die zur fraglichen Zeit vorhanden ist.

Wenn diese Abweichung bestimmt wurde, sendet die Referenzstation ein Korrektursignal an den Empfänger, in dem angegeben ist, inwiefern die vom Satelliten gesendete Position falsch ist. Auch hier ist die Positionsbestimmung umso genauer, je mehr Satellitensignale empfangen werden (Badea and Eriksson 2005).

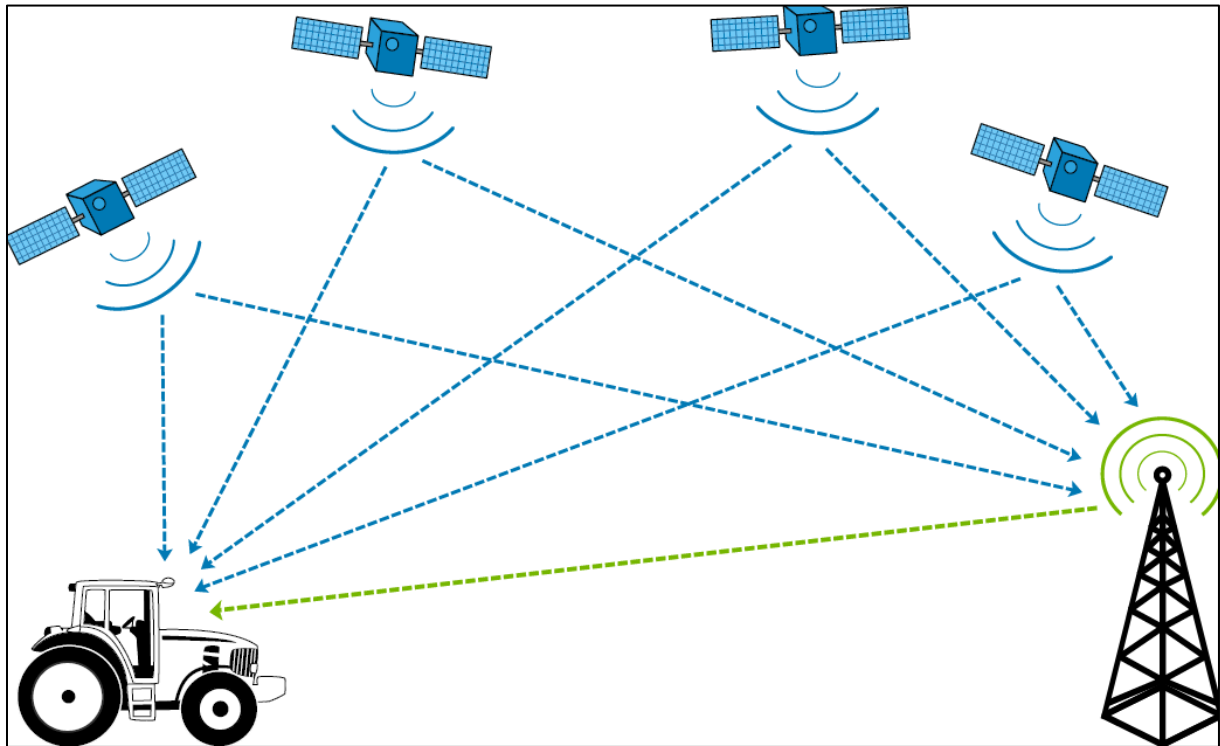
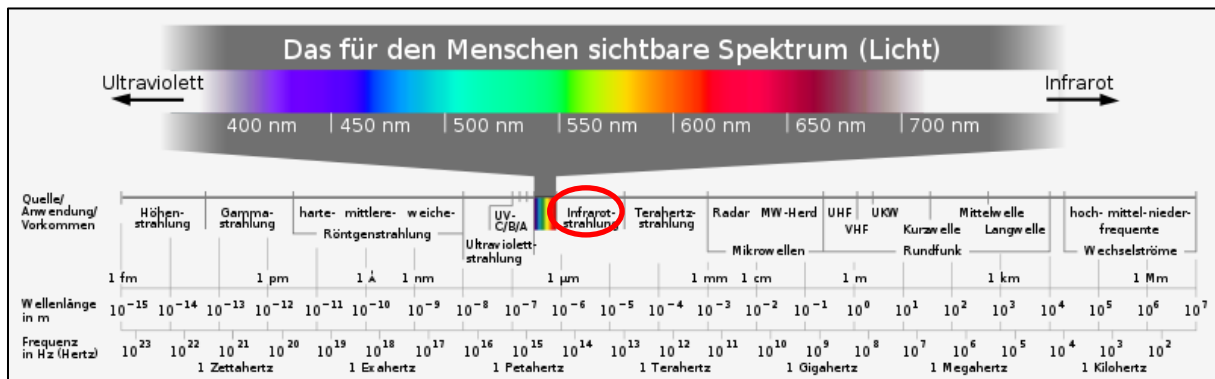


Abbildung 3 GPS Differential Correction (gps-differential-correction n.d.)

2.2 Infrarot

Infrarotstrahlung befindet sich im Spektrum zwischen rotem Licht und den kürzesten Mikrowellen. Es ist eine unsichtbare elektromagnetische Strahlung und lässt sich noch feiner zwischen kurzem, mittlerem und fernem Infrarot unterscheiden. Die kurzwelligen Strahlen liegen im Bereich von 0.8 bis 3 μm , während das ferne Infrarot sehr viel langwelliger ist und im Bereich zwischen 20 und 300 μm liegt (Retscher and Kistenich 2006).



hängt stark von der Beschaffenheit und der Temperatur des Materials ab, auf das die Schallwelle trifft (Retscher and Kistenich 2006).

Da diese Einflüsse das Ergebnis beeinflussen, müssen sie bei der Positionsberechnung mit beachtet werden. Das stellt einen erheblichen Nachteil dar und macht die Verwendung von Ultraschall sehr schwierig (Retscher and Kistenich 2006a).

Genau wie die Infrarotsender und -empfänger sind auch die Ultraschallgeräte günstig und einfach erhältlich (Gleim 2012).

2.4 Bluetooth

Bluetooth ist mittlerweile in fast allen Smartphones verbaut. Das bedeutet, dass durch die bereits vorhandene Infrastruktur keine neuen Kosten bei der Positionsbestimmung durch Bluetooth anfallen. Ursprünglich wurde es genutzt, damit Daten von Handy zu Handy geschickt werden konnten. Mittlerweile wird Bluetooth jedoch für sehr viel mehr verwendet. Beispielsweise kann das Telefon mit Lautsprechern, Kopfhörern oder Fernsehern kommunizieren. Doch ähnlich wie Infrarot ist auch Bluetooth nur für Kurzstreckenkommunikation geeignet. Die Reichweite liegt bei 10 bis 100 Metern und die Datentransferrate beträgt maximal 768 kBit/s. Dies ist im Vergleich zum nachfolgend beschriebenen WLAN sowohl eine geringere Reichweite, als auch eine weitaus geringere Datentransferrate (King et al. 2006).

Der Frequenzbereich sowohl von Bluetooth, als auch von WLAN liegt zwischen 2,402 bis 2,483 GHz. Radiowellen in diesem Frequenzbereich werden stark vom menschlichen Körper reflektiert. Grund für diese Reflektionen ist der hohe Wasseranteil im menschlichen Körper. Die Positionsbestimmung hängt also auch davon ab, wo die Person ihr Handy bei sich trägt und ob der Körper sich zwischen Telefon und Empfänger befindet (King et al. 2006).

2.5 WLAN

Die am weitesten verbreitete Technologie und derzeitiger Standard des Funk-LANs (Wireless-LAN) ist unter der Bezeichnung IEEE 802.11 bekannt. Das WLAN dient,

genau wie Bluetooth, ursprünglich der drahtlosen Vernetzung von einzelnen Computern untereinander oder der mobilen Verbindung von Computern mit dem Festnetz (Dornbusch and Zündt 2002).

Das WLAN nach IEEE 802.11 Standard hat, ähnlich wie ein herkömmliches Mobilfunknetz eine zellulare Struktur. Die sogenannten Basisstationen, oder auch Access Points (AP) genannt, entsprechen den Sendestationen im Mobilfunknetz (Dornbusch and Zündt 2002). Die Mobiltelefone, Computer oder ähnliches sind dann, genau wie im Mobilfunk, die „Mobilen Stationen (MS)“ (Dornbusch and Zündt 2002).

Das WLAN ermöglicht eine Reichweite von bis zu 300 Metern und eine Datentransfer-rate von bis zu 54 Mbit/s (King et al. 2006).

Die Kommunikationsreichweite ist im Vergleich zu Bluetooth höher, ist jedoch stark abhängig von Störfaktoren (King et al. 2006).

Grundsätzlich wird in vielen Verfahren die Entfernung zwischen Sender und Empfänger aus der Signalstärke errechnet. Es handelt sich dabei um das physikalische Phänomen, dass in der Nachrichtentechnik die Feldstärke mit zunehmender Entfernung vom Sender abnimmt. In einem durch Reflektionen ungestörten Raum, einem Vakuum, ist dies ein monotoner funktionaler Zusammenhang zwischen Leistungsdichte und dem Abstand zum Sender. Diese Eigenschaft tritt beispielsweise im Weltall auf und wird als Freiraumdämpfung bezeichnet (King et al. 2006).

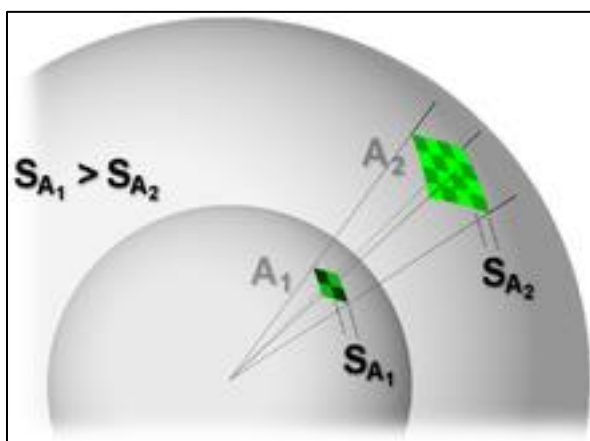


Abbildung 5 Leistungsdichte Freiraumdämpfung (Leistungsdichte n.d.)

Wie schon im Kapitel Bluetooth beschrieben, wird die Signalstärke nicht nur durch die Freiraumdämpfung schwächer, je weiter man vom Sender entfernt ist, sondern auch

durch andere Hindernisse. In Umgebungen, bei denen Sender und Empfänger keinen Sichtkontakt haben oder es anderweitig zu Hindernissen kommt, kann die Entfernung nicht anhand einer monotonen Funktion errechnet werden. Hindernisse können Wände und Möbel sein, es können aber auch wie bei Bluetooth beschrieben, Menschen, Tiere und Pflanzen Signale abschirmen oder reflektieren. Aus diesem Grund werden hochwertige Antennen benötigt (King et al. 2006).

Mit dem unten beschriebenen Received-Signal-Strength-Verfahren (RSS) werden schon heute Fußgängerbewegungen mit einer Genauigkeit von 5 bis 20 Metern per WLAN-Tracking aufgenommen (Köppe 2014). In dieser Arbeit wird genau diese Aussage überprüft. Es soll die Genauigkeit und die Störanfälligkeit durch verschiedenste Einflüsse bei der Aufnahme der Daten herausgefunden werden.

2.6 Video

Die Aufnahmetechnik per Video ist ein visuelles Verfahren, wobei mit einer oder mehreren Kameras aufgenommen wird. Dieses Verfahren wird hauptsächlich in der Materialprüfung eingesetzt. Es kann ebenso zur Lokalisation von Personenströmen verwendet werden. Dabei wird jeder Pixel der Kamera mit einem x- und einem y-Wert versehen. Durch die Verschiebung der Pixel über die Zeit können dann Bewegungen erkannt werden. Mit zwei Kameras kann durch Stereofotogrammetrie ein 3D Koordinatensystem erstellt werden. Dadurch können Positionsänderungen im dreidimensionalen Raum aufgenommen und später dargestellt werden (Köppe 2014).

Ein etwas anderes Verfahren ist das Streifenprojektionsverfahren. Zusätzlich zu den zwei verwendeten Kameras werden hier Streifenmuster auf die Umgebung projiziert und von den Kameras erfasst. Durch Bewegungen an der Oberfläche werden diese Streifen verzerrt. Dadurch kann die aktuelle Position bestimmt werden (Köppe 2014).

Die Datenauswertung ist hier jedoch schwierig und sehr oft fehlerhaft, da immer wieder unvorhersehbare Szenarien auftreten und ein Systemversagen verursachen.

Zudem ergeben sich bei Videoaufnahmen sehr komplizierte rechtliche Fragen aus dem Datenschutzgesetz.

Nicht zuletzt wollen Veranstalter meist nicht, dass Ihre Kunden gefilmt werden, da sich diese beobachtet fühlen könnten. Auch das Filmen der Mitarbeiter trifft auf Ablehnung. Mitarbeiter fühlen sich bei ihrer Arbeit schnell überwacht.

2.7 Händisch

Wenn keine dieser oben genannten Hilfsmittel zur Verfügung steht, gibt es noch die Möglichkeit durch händische Zählungen verschiedene Aussagen über Fußgängerströme zu treffen.

So kann beispielsweise ein Ladenbetreiber zählen, wie viele Menschen seinen Laden in einer bestimmten Zeit betreten.

Oder auf einem Markt können Angestellte mit Zählgeräten über das Gelände gehen und die Anzahl der Personen messen, die sich gerade auf den Markt befinden. Hierbei ist das größte Problem, dass bei dieser Art der Zählung die Verweildauer der Gäste auf dem Markt unbekannt ist. So könnte es sein, dass den Markt tausend Personen besuchen. Die Betreiber wissen aber nicht, ob diese tausend Besucher den ganzen Tag vor Ort bleiben, oder nur 10 Minuten, um dann von anderen Besuchern abgelöst zu werden. Somit ist diese Art der Personenanalyse nur sehr oberflächlich und kann keine genauen Daten über beispielsweise die Aufenthaltsdauer, oder die Bewegungsprofile/Aufenthaltsorte der Besucher liefern. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass zu den meisten Datenaufnahmen viele Hilfskräfte benötigt werden.

2.8 Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Übersicht aller zuvor beschriebenen Systeme zur Lokalisierung mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Dabei signalisiert ein + + / - - jeweils einen großen Vor- bzw. Nachteil gegenüber den anderen Verfahren. Ein + oder - jeweils einen weniger deutlichen Vor- oder Nachteil, und ein O weder einen Vor- noch einen Nachteil (Gleim 2012).

	Genauigkeit	Verfügbarkeit	Kosten	Reichweite	Anfälligkeit
GPS	+	++	O	++	+
Pseudolit-GPS	++	--	--	+	-
Infrarot	O	-	+	-	--
Ultraschall	++	--	--	-	--
Bluetooth	O	-	+	+	+
WLAN	+	++	+	+	+
Video	++	++	O	+	-
Händisch	--	+	O	O	--

Tabelle 1 Übersicht Lokalisierungsmethoden (nach Vorbild (Novrianto 2012))

Die Wahl der Methode sollte sich dann an den Parametern orientieren, die für die Nutzung am wichtigsten sind.

3 Lokalisationsverfahren

Bei der Positionsbestimmung sind die Positionen der mehrfach vorhandenen Basisstationen bekannt, während die Position der mobilen Station unbekannt ist. Die in der Folge beschriebenen Verfahren zeigen, wie unter diesen Voraussetzungen eine Lokalisierung stattfinden kann (Schmidt 2010).

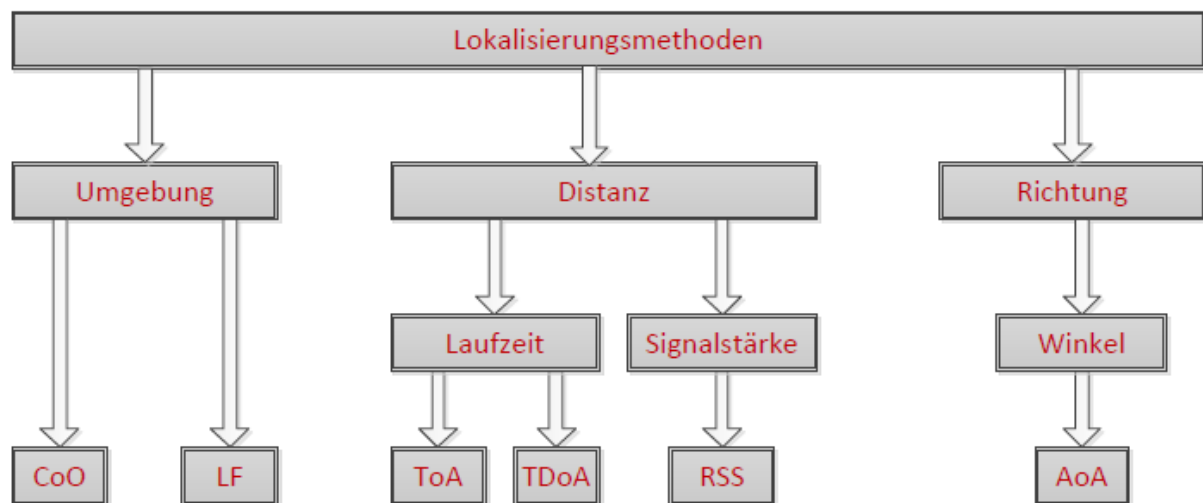


Abbildung 6 Lokalisierungsmethoden (Novrianto 2012)

Bevor die einzelnen Methoden zur Lokalisation näher erläutert werden, werden noch zwei Methoden beschrieben, die häufig gemeinsam mit den Lokalisationsmethoden aufgezählt werden. Hierbei handelt es sich aber eigentlich nur um geometrische Rechenverfahren, die zur Berechnung der Methoden zur Lokalisation benutzt werden, die Trilateration und die Triangulation. (Novrianto 2012)

3.1 Trilateration

Das Berechnungsverfahren Trilateration bestimmt den Standort anhand der Entfernung der Mobilstation (MS) zu den Basisstationen (BS) (Novrianto 2012).

Dabei müssen die Standpunkte der BS und deren jeweilige Abstände zu der MS bekannt sein. Mit diesen Angaben zu mindestens 3 BS können die Koordinaten der MS berechnet werden. Es werden um alle BS Kreise mit dem Abstand der MS zur jeweiligen BS als Radius gezeichnet. Der Schnittpunkt, der sich dabei ergibt, ist die Position der MS (Novrianto 2012).

In der Abbildung 7 sind die BS als Fixpunkte dargestellt. Der Fall C spiegelt die oben beschriebene Situation wieder. Bei drei vorhandenen Fixpunkten kann es nur einen Schnittpunkt aller drei Kreise geben, während der Fall B noch zwei mögliche Aufenthaltsorte für die MS zeigt (Novrianto 2012).

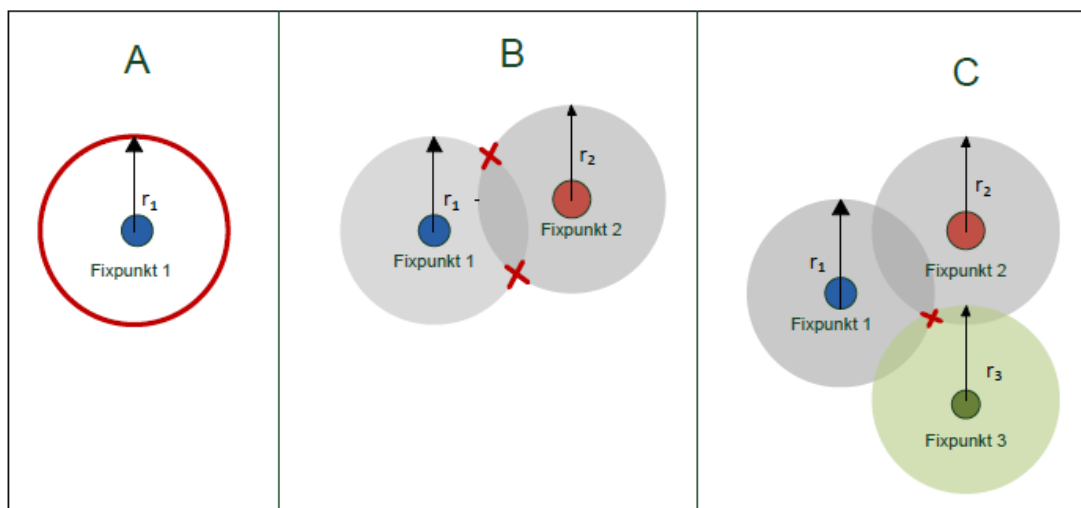


Abbildung 7 Trilateration (Novrianto 2012)

3.2 Triangulation

Während sich das Verfahren der Trilateration mit Entfernungen beschäftigt, wird bei der Triangulation mit Winkeln gearbeitet (Novrianto 2012).

Im Vergleich zur Trilateration werden bei der Triangulation nur zwei BS mit bekannten Koordinaten benötigt. Die Richtung in der sich die MS von der BS befindet muss ebenfalls bekannt sein. Dann kann ein Dreieck aus den zwei bekannten Punkten und dem dritten gebildet werden (Novrianto 2012).

In Abbildung 8 wird das Messverfahren der Triangulation grafisch dargestellt.

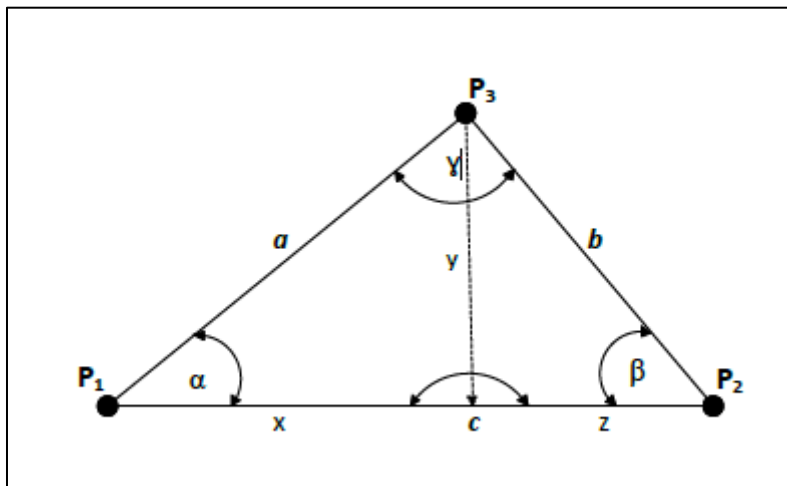


Abbildung 8 Triangulation (Novrianto 2012)

3.3 CoO (Cell of Origin)

Beim zellbasierten Verfahren oder auch Zellortung genannt wird untersucht, mit welcher Basisstation der Nutzer verbunden ist. Dieses Verfahren der mobilen Positionsschätzung stammt aus der Mobilfunktechnik. Dabei wird die genaue Identifikationsnummer (ID) der Zelle, in der sich der Nutzer befindet identifiziert. Da sich ein Nutzer nur mit einer Basisstation, z.B.: beim WLAN oder beim Mobilfunk, verbinden kann, ist diese ID des Nutzers auch gleichzeitig die aktuelle Zelle, in der er sich befindet. Wenn die Position der Basisstation und die Größe der Zelle ungefähr bekannt sind, dann lässt sich hieraus abschätzen, wo die ungefähre Position des Nutzers ist (Novrianto 2012).

Je kleiner die Zelle ist, desto genauer ist das Verfahren. Da die Größen von WLAN Zellen jedoch relativ variabel sind, ist eine genaue Positionsbestimmung nicht möglich. (Die Genauigkeit liegt bei Freiflächen um die 200 Meter und in Gebäuden ungefähr bei 25 bis 50 Metern) (Novrianto 2012; Müller 2004).

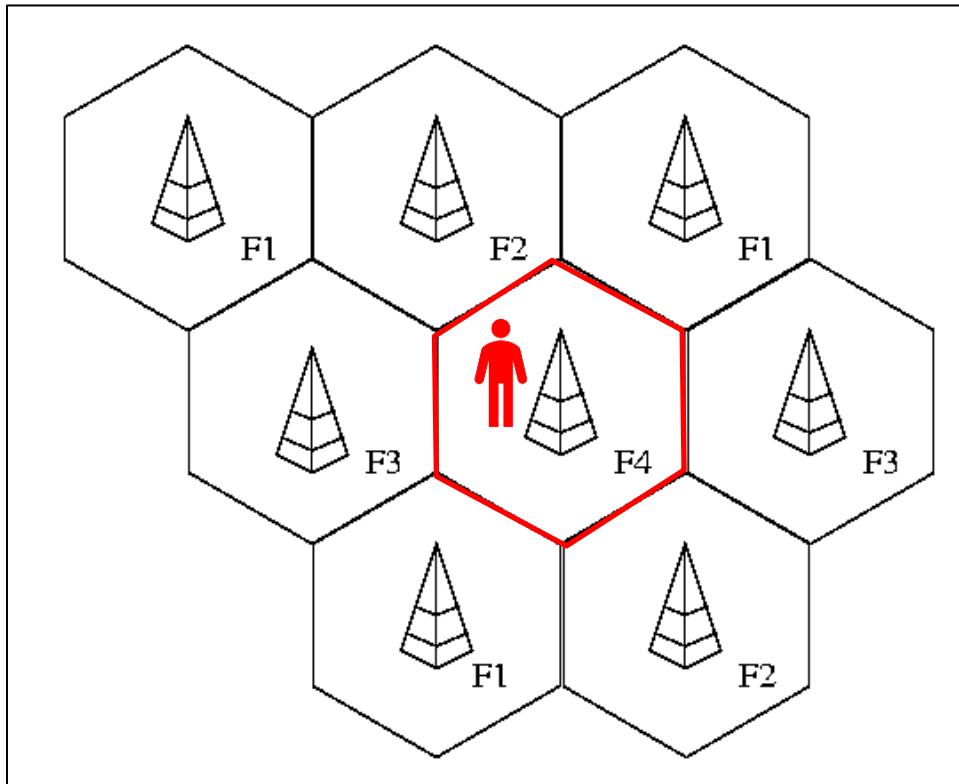


Abbildung 9 CoO (Frequency_reuse n.d.)

3.4 RSS (Received Signal Strength) und LF (Location Fingerprinting)

Das RSS-Verfahren berechnet die Entfernung zwischen Sender und Empfänger aus der Signalstärke. Diese Signalstärke kann durch einen sogenannten Medienkoeffizienten in eine Entfernung umgerechnet werden. Der Medienkoeffizient beschreibt das Material, das sich zwischen dem Sender und dem Empfänger befindet (Köppe 2014).

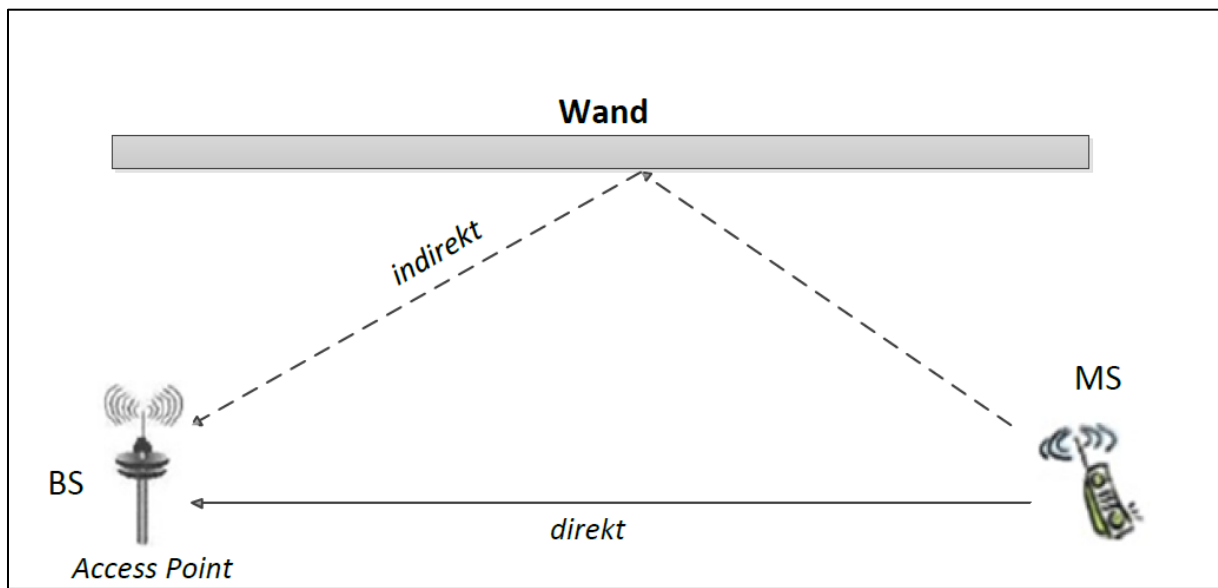


Abbildung 10 RSS (Novrianto 2012)

Wie bereits beschrieben, wäre der Medienkoeffizient im luftleeren Raum die Freiraumdämpfung. In der Realität befinden sich jedoch verschiedenste Störquellen sowohl innerhalb als auch außerhalb von Gebäuden. Diese Störquellen können Wände, Tische und andere Gegenstände sein. Als Störquellen zählen auch Tiere, Pflanzen und Menschen (Prof. Dr. Uwe Großmann, n.d.).

Um diese unterschiedlichen Einflüsse berücksichtigen zu können, gibt es ein logarithmisches Distanzverlustmodell. Die Formel für Reflektionen innerhalb von Gebäuden ist beispielsweise:

$$P_{RX} / \text{dBm} = P_0 / \text{dBm} - 10 y \log_{10} (d/d_0)$$

Hier ist P_0 die empfangene Signalstärke bei der Entfernung d_0 und y ist die Distanzverlustvariable. Die Parameter P_0 , d_0 und y werden der Geometrie des Raumes oder der Umgebung angepasst (Prof. Dr. Uwe Großmann, n.d.).

Anhand dieser Formel wird die Rückrechnung von der Signalstärke in Meter verbessert und kann individuell auf die verschiedenen Einsatzszenarien angewendet werden.

Um die Genauigkeit des RSS-Verfahrens zu verbessern, wird vor der eigentlichen Messung eine Fingerprinting Karte angelegt. Das Location Fingerprinting wird in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase, der initialen Kalibrierungsphase, wird der gesamte Versuchsbereich vermessen. Hier werden zu jedem Punkt auf der Karte, sowohl

die Position, als auch die Signalstärke zu den vorhandenen Basisstationen gemessen und in einer Datenbank gespeichert. Diese Datenbank wird oft als Radio Map bezeichnet. In der anschließenden Lokalisierungsphase werden die aktuell gemessenen Signalstärken, mit denen aus der Datenbank verglichen. So kann anhand der vorher eingelesenen Fingerabdrücke die aktuelle Position bestimmt werden. Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt von der Anzahl der Referenzpunkte ab, die vorher in die Datenbank eingelesen wurden. Je mehr Referenzpunkte es gibt, umso genauer kann später die Position bestimmt werden (Köppe 2014; Prof. Dr. Uwe Großmann, n.d.).

Im folgenden Beispielbild ist eine Fingerprinting Map zu sehen. Hier beschreiben die roten Stellen Bereiche, in denen eine höhere Anzahl von Referenzmessungen nötig ist, da dort eine höhere Dichte an Störfaktoren vorhanden ist. In den blauen Bereichen ist die Dichte an Störfaktoren geringer und somit werden weniger Referenzmessungen benötigt.

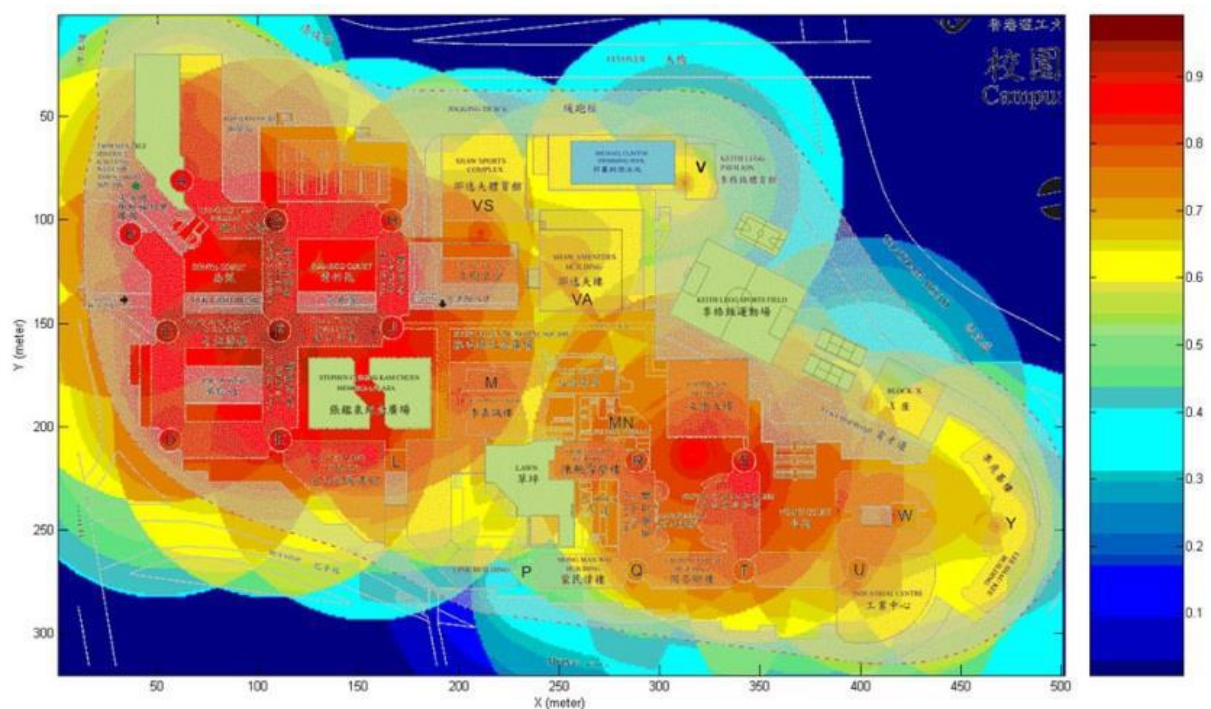


Abbildung 11 Fingerprinting Map (Köppe 2014)

3.5 AoA (Angle of Arrival)

Das AoA Verfahren ermittelt die Position des Senders nicht anhand von Signallaufzeiten, sondern über den Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung einer Funkwelle (Antenna-Array) und einer Referenzrichtung im Empfänger selbst. Hier reicht es aus für die Lokalisation einen Sender und zwei Empfängerstationen zu haben. Die Basisstationen benötigen jedoch mehrere gerichtete Antennen (Novrianto 2012).

Die Relation der Winkel zu den Basisstationen kann auf Grund der gerichteten Antennen herausgefunden werden. Jede Antenne misst zu einer bestimmten Zeit eine andere Phase der Welle. So kann aus der Phasenverschiebung und der Wellenlänge die Richtung des Senders bestimmt werden. Aus diesem errechneten Winkel zwischen den Basisstationen und dem Empfänger lässt sich ein Schnittpunkt der Geraden berechnen. Dieser Schnittpunkt ist gleichzeitig die Position des Senders (Müller 2004; Novrianto 2012).

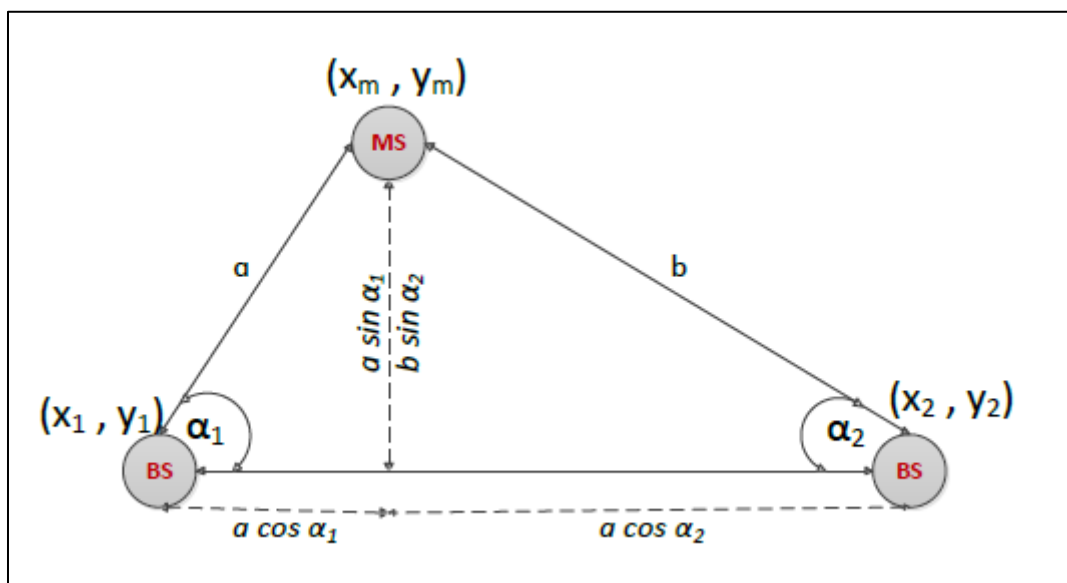


Abbildung 12 AoA (Novrianto 2012)

3.6 ToA (Time of Arrival)

Bei dem „Time of Arrival“ Verfahren wird die Signallaufzeit von einem Sender zu einem Empfänger gemessen. Hierbei wird nur die Zeit des Weges in eine Richtung gemessen. Um eine hohe Genauigkeit bei diesem Verfahren erlangen zu können, spielt die absolute Zeitsynchronisation zwischen allen Geräten eine große Rolle. Hier ist eine Genauigkeit der Uhren zwischen Sender (Basisstation) und Empfänger (Mobile Station) im Bereich von ≤ 1 ns nötig (Novrianto 2012).

Mit Hilfe von Trilateration kann daraus die Position des Empfängers ermittelt werden. Dabei werden mindestens 3 Basisstationen benötigt. Die Distanz (a_i) zwischen Sender und Empfänger lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$a_i = (t_i - t_0) * c$$

Die Zeiten t_0 (Empfangszeit) und t_i (Sendezeit) sind bekannt. Die Variable c gibt die Lichtgeschwindigkeit an, mit der sich die elektromagnetischen Wellen ausbreiten. Abbildung 13 zeigt wie ein solches Verfahren aussieht, bei dem mit Hilfe von Trilateration die Position eines Empfängers berechnet wird (Novrianto 2012).

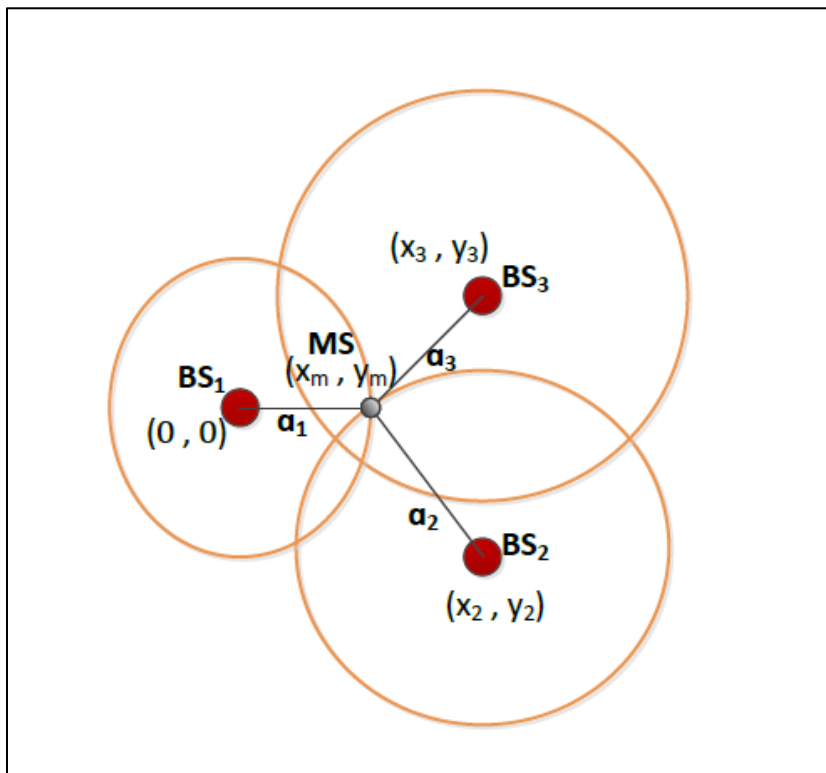


Abbildung 13 ToA mit drei BS (Novrianto 2012)

3.7 TDoA (Time Difference of Arrival)

Genau wie beim ToA-Verfahren wird auch bei der TDoA die Signallaufzeit gemessen um die Distanz zwischen Sender und Empfänger zu messen. Im Vergleich zum ToA kann beim TDoA der Sender sein Signal gleichzeitig an mehrere Empfänger senden. Die Empfänger speichern den Zeitpunkt in dem das Signal empfangen wurde und vergleichen den Zeitpunkt mit den Zeitstempeln der anderen Basisstationen (Empfänger). Auch hier ist wie bei ToA die absolute Zeitsynchronität unter den Basisstationen von größter Bedeutung. Die Zeitsynchronität zwischen Sender und Empfänger ist nicht von Bedeutung. Durch das Senden mehrerer Impulse kann die Genauigkeit verbessert werden, da hier die Signalstärken gemittelt werden können (Novrianto 2012).

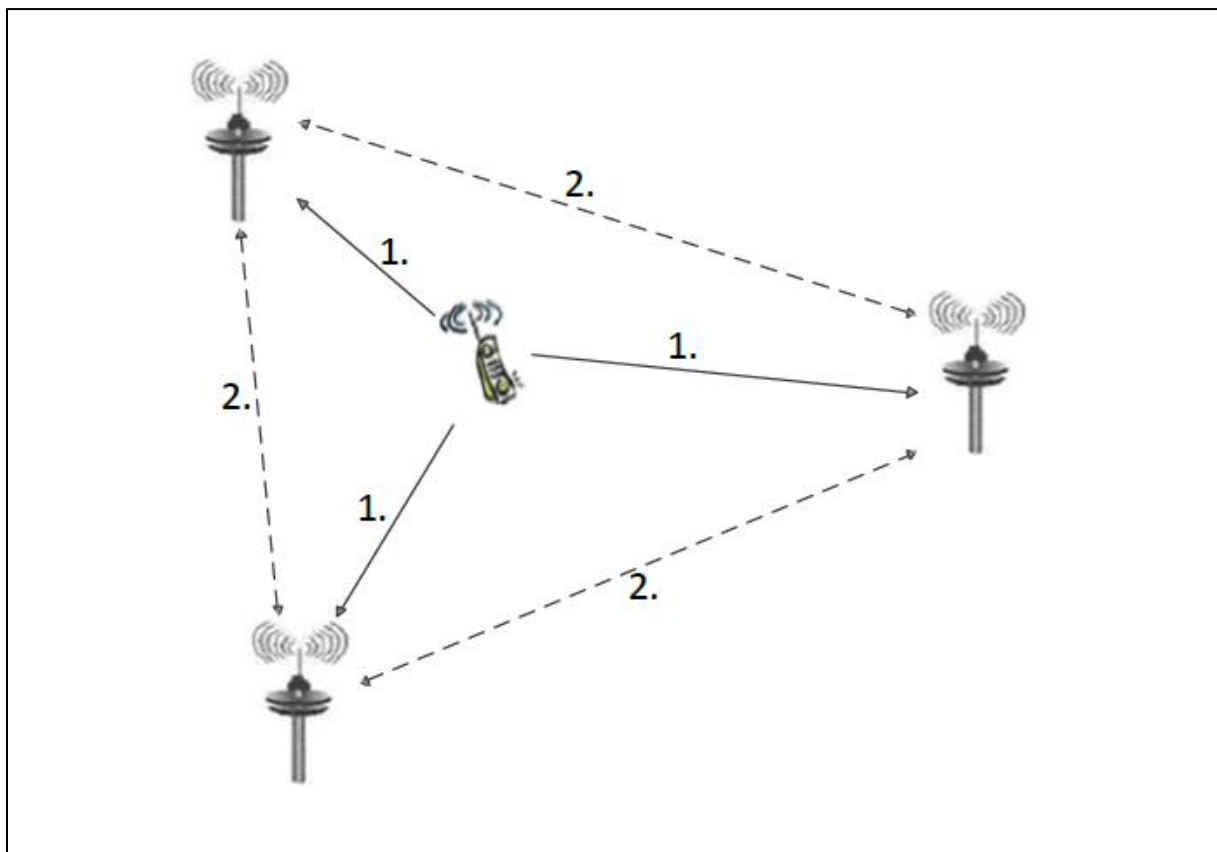


Abbildung 14 TDoA (Novrianto 2012)

In Abbildung 14 lässt sich erkennen, dass der Sender näher am oberen Basispunkt liegt. Somit wäre der Zeitstempel dort kleiner, als bei den unteren beiden Punkten. Die

genaue Berechnung erfolgt über die Hyperbeldarstellung (Abbildung 15). Bei der Hyperbeldarstellung wird das Abstandsverhältnis zwischen der mobilen Station und zwei Basisstationen berechnet. So sind in der Grafik keine Kreise, wie beim ToA-Verfahren zu sehen, sondern Hyperbeln (Novrianto 2012).

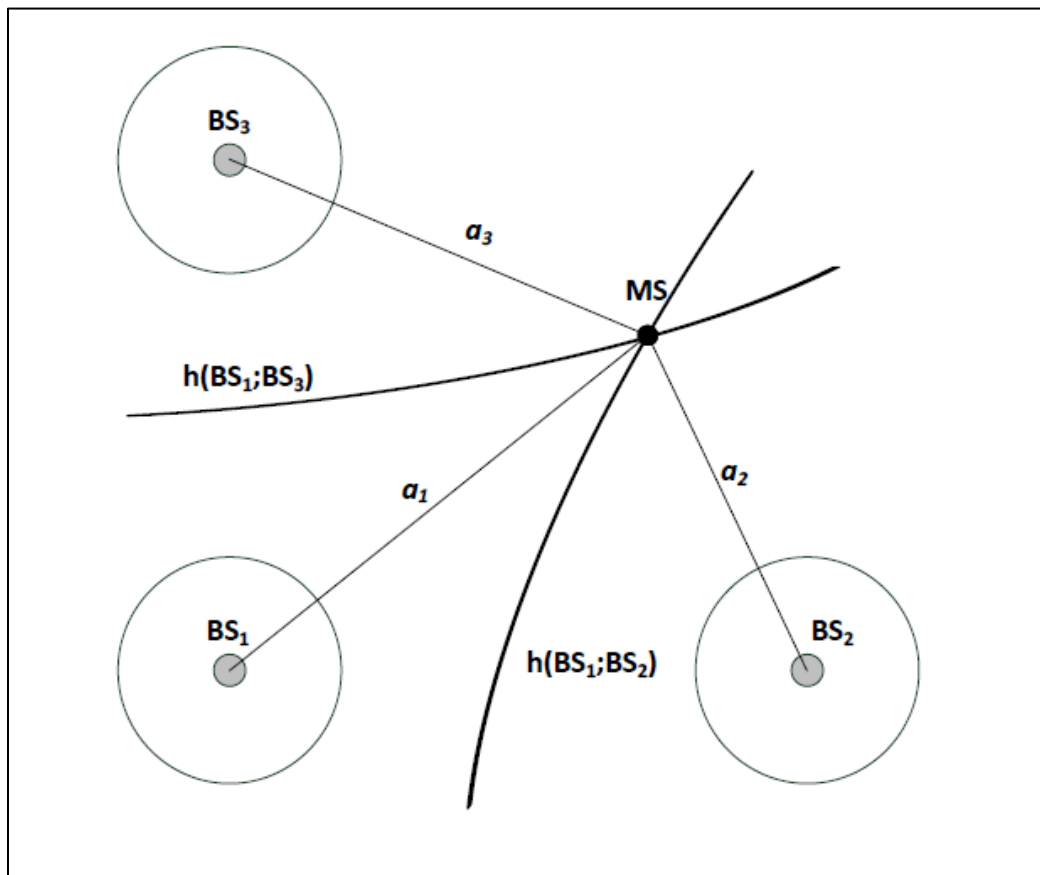


Abbildung 15 Hyperbeldarstellung des TDoA-Verfahrens (Novrianto 2012)

3.8 Anwendbarkeit beim WLAN-Tracking

Welches Lokationsverfahren angewendet werden kann, richtet sich nach den Methoden, mit denen die Daten erhoben wurden. In der Feldstudie dieser Arbeit wird das WLAN-Verfahren getestet. Da dadurch weder eine exakte Zeitsynchronität mit einer Atomuhr hergestellt werden kann, noch gerichtete Antennen verwendet werden können, wird hier das RSS-Verfahren angewendet. Es werden Distanzen anhand von empfangenen Signalstärken errechnet. Die Berechnungsverfahren werden in den Kapiteln der Feldstudie erläutert.

4 Rechtliche Grundlagen

Wenn das Wort Personen-Tracking fällt wird als erstes die Frage nach dem Datenschutz gestellt. Grundlage für die rechtliche Zulässigkeit des Trackings ist das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG). Da es sich nicht um eine Form der Telekommunikation oder eines Telemediendienstes handelt, kommen die speziellen Regelungen aus diesem Bereich hier nicht zur Anwendung (Scholz Heike 2014).

Das Bayerische Datenschutzgesetz (BayDSG) behandelt den Schutz des Persönlichkeitsrechtes entsprechend dem Bundesdatenschutzgesetz.

Nach dem Bundesdatenschutzgesetz darf das Persönlichkeitsrecht des Einzelnen nicht beeinträchtigt werden (§ 1 BDSG)

§ 1 Zweck und Anwendungsbereich des Gesetzes

(1) Zweck dieses Gesetzes ist es, den Einzelnen davor zu schützen, dass er durch den Umgang mit seinen personenbezogenen Daten in seinem Persönlichkeitsrecht beeinträchtigt wird.

Was unter personenbezogenen Daten zu verstehen ist, bestimmt sich nach § 3 BDSG.

§ 3 Weitere Begriffsbestimmungen

(1) Personenbezogene Daten sind Einzelangaben über persönliche oder sachliche Verhältnisse einer bestimmten oder bestimmbaren natürlichen Person (Betroffener).

[...]

(4) Verarbeiten ist das Speichern, Verändern, Übermitteln, Sperren und Löschen personenbezogener Daten.

[...]

Demnach ist es für die Frage der Zulässigkeit entscheidend, ob es sich bei der in dieser Arbeit vorgenommenen Datensammlung und –verarbeitung um die Sammlung, Speicherung, Verarbeitung oder Weitergabe personenbezogener Daten handelt und ob bei der Media-Access-Control-Adresse (MAC-Adresse) von personenbezogenen Daten gesprochen werden kann. Bei der WLAN-Suche sendet jedes Mobiltelefon automatisch diese Adresse mit. Die MAC-Adresse ist eine Nummer, die jedem Mobiltelefon individuell zugeordnet werden kann.

Diese Frage wird kontrovers diskutiert. In einem Interview mit Heike Scholz hat Jan L. Fröhlich, Rechtsanwalt in Berlin, die Meinung vertreten, dass man die MAC ID *„nicht ohne weiteres unter diese personenbezogenen Daten“* (Scholz Heike 2014) zählen kann. Dann könnten die Daten per WLAN ohne rechtliche Schwierigkeiten aufgenommen und gespeichert werden

Aus der Sicht von Datenschützern ist die Nutzung der MAC-Adresse zu Trackingzwecken umstritten und befindet sich rechtlich in einer Grauzone. Durch die eindeutige Identifizierung der Hardware, ein erfasstes Bewegungsprofil und noch dazu vorliegenden Daten einer Person, wie Rechnungen an der Kasse eines Einzelhandels oder ähnliches, könnten im „Big-Data-Kontext“ alle Daten kombiniert und verarbeitet werden. So könnten unter Umständen Rückschlüsse auf die reale Person hinter der MAC-Adresse gezogen werden (Fuchs 2013).

Doch selbst wenn die MAC-Adressen als personenbezogene Daten gelten, gibt es eine Möglichkeit die Daten in nicht personenbezogene Daten umzuwandeln. Um die getrackten Personen zu schützen, werden die MAC-Adressen schon im RPi mit einer sogenannten Hash-Funktion verschlüsselt. So bekommt der Nutzer nur eine „zerhackte“ Zahl geliefert, mit der keine Rückschlüsse auf die reale Person gezogen werden können. Diese Form der Anonymisierung verwenden bereits einige Unternehmen in Deutschland, welche das Personentracking kommerziell anbieten (Fuchs 2013).

Um bei den Feldstudien dieser Arbeit alle getrackten Personen zu schützen, wurde auch bei den hier verwendeten RPi's diese Hash-Funktion benutzt. Damit werden die Persönlichkeitsrechte der Marktbesucher geschützt. Es handelt sich nicht mehr um personenbezogene Daten im Sinne des Bundesdatenschutzgesetzes.

5 Feldstudie - Evaluation von Messgeräten zur Detektion von Fußgängerströmen

5.1 Ziele und Erwartungen an die Feldstudie

Der Großteil der Feldstudie hat in München auf dem Weihnachtsmarkt der Münchner Freiheit über fünf Messtage stattgefunden. Das Ziel dieser Arbeit ist es den WLAN-Tracker der TU München zu evaluieren. Es wurden dabei verschiedenste Tests durchgeführt, um grundlegende Aussagen über die Lokalisation von Fußgängern, anhand von WiFi-Tracking, treffen zu können. Das Endergebnis der Studie soll Aufschluss über die Möglichkeiten geben, die WLAN bietet. Es gilt herauszufinden, ob Menschenströme hinreichend genau dargestellt werden können, oder ob es sogar möglich ist den Standort einzelner Personen genau zu bestimmen. Dafür wurden im Vorfeld der Feldstudie auf dem Weihnachtsmarkt weitere Versuche gemacht, um einzelne Fragen herauszuarbeiten. Diese Versuche wurden auf einem freien Feld in Untermenzing durchgeführt.

In der Folge werden die einzelnen Versuche kurz aufgelistet:

- Identifizierung der Testgeräte (Handy)
- Sendehäufigkeit der Testgeräte
- Dämpfung gegenüber Entfernung
- Signalschwankung über die Zeit
- Genauigkeit der GPS-Messung
- Trilateration – Referenzmessungen
- Gesamtbesucheranzahl
- WiFi-Abdeckung

5.2 Technische Vorbereitung der Aufnahmen

Für die Durchführung einer solchen Studie ist es wichtig sowohl das nötige Equipment zusammenzustellen, als auch im Vorfeld für alle Eventualitäten zu planen. Das

Equipment wird in der Folge beschrieben. Auf die Besonderheiten bei der Planung einzelner Feldstudien wird bei der Beschreibung der einzelnen Versuche genauer eingegangen.

Die Raspberry Pi (RPi) – Boxen

Bei allen Messungen wurden die RPi's des Lehrstuhls für Computergestützte Modellierung verwendet, da ein großer Teil dieser Arbeit die Evaluation dieser Messgeräte ist.



Abbildung 16 Raspberry Pi



Abbildung 17 Raspberry Pi

Die gesamte Messvorrichtung besteht aus dem RPi (Abbildung 16; Abbildung 17) und einem externen portablen Akku (Power Bank). Beides wird in eine Plastikbox gelegt und luftdicht verschlossen (Abbildung 18), um es vor der Witterung zu schützen.



Abbildung 18 Raspberry Pi in der Box

Die RPi's lassen sich nur durch eine LAN-Verbindung einschalten. So wird vor jeder Benutzung der RPi mit einem Laptop verbunden und damit gestartet. Der in der Box enthaltene Akku mit 14000 Milliampere Stunden (mAh) hält auf Grund des geringen Stromverbrauchs weit über einen Tag. Auch der im RPi enthaltene Speicherplatz reicht aus, um mindestens 10 Stunden Daten aufzunehmen. Das Ausgabeformat des RPi sind comma-separated values (CSV) Dateien, welche einfach strukturierte Textdateien sind, die wenig Speicherplatz benötigen und einfach weiterzuverarbeiten sind.

5.3 Vorversuche

5.3.1 Identifizierung der Testgeräte (Handy)

Um am Weihnachtsmarkt später Referenzmessungen machen zu können und den Weg der Testperson nachvollziehen zu können, musste zuerst die verschlüsselte Nummer der Mobiltelefone herausgefunden werden, die später als Referenzgeräte

verwendet werden sollten. Aufgrund der Hash-Funktion des RPi kann kein Rückschluss von der verschlüsselten Nummer auf die tatsächliche MAC-Adresse der Handys gezogen werden. Dadurch kann die verschlüsselte Adresse der Testgeräte nicht einfach herausgefunden werden. Da nicht alle, sich in Reichweite eines RPi's befindlichen Geräte aufgestellt werden können, wurde ein Testumfeld gewählt, das Störsignale abschirmt. So wurde bei diesem Versuch ein eingeschaltetes Mobiltelefon zusammen mit einem eingeschalteten RPi für einige Minuten in eine Mikrowelle gelegt. So kann bei der Auswertung der Zeitraum betrachtet werden, in dem sich beide Geräte in der Mikrowelle befunden haben und das einzige Signal, das erfasst wurde, die verschlüsselte MAC-Adresse des Handys ist.

5.3.2 Sendehäufigkeit der Testgeräte

Wesentlicher Bestandteil der Verbindungsaufnahme ist die Suche des Mobiltelefons nach einer Basisstation. Dazu sendet das Handy in Abständen eine Anfrage aus. Diese Anfrage wird als Probe Request bezeichnet und beinhaltet die MAC-Adresse des anfragenden Handys.

Die Regelmäßigkeit dieser Anfragen ist für die späteren Berechnungsverfahren und deren Genauigkeit von Bedeutung. Sie ist jedoch herstellerspezifisch und beträgt ungefähr eine Anfrage pro Minute. Diese Information stützt sich auf die Antwort aus einem Fachforum, da dazu keine Informationen von Herstellern gefunden werden konnten (constant signal strength of a 802.11 probe request 2017). Ein exakter Wert ist hier jedoch nicht von Bedeutung. Die Häufigkeit der Probe Requests hat direkten Einfluss auf die statistische Auswertung des Trackings.

Der Lehrstuhl stellte zur Verbesserung der Genauigkeit bei Referenzmessungen eine Applikation (App) zur Verfügung. Mit der App PedCounter sollte die Häufigkeit der Anfragen der Testgeräte deutlich erhöht werden und jede Sekunde eine Anfrage geschickt werden.

Die Auswertung der Feldversuche zeigt, dass die Anfragehäufigkeit starke Schwankungen aufweist und trotz Verwendung der App nicht jede Sekunde einen Probe Request erzwingt.

Auf Grund der zeitlichen Rahmenbedingungen konnte sowohl die Auswertung der Vorversuche, als auch die Auswertung der Feldversuche auf dem Weihnachtsmarkt, erst nach der gesamten Datenaufnahme durchgeführt werden.

Zur Darstellung der Versuche werden in dieser Arbeit meistens Excel-Tabellen und Grafiken benutzt. Das Ausgabeformat orientiert sich an der bereits erwähnten CSV-Datei. Die erste Spalte (Spalte A) enthält die Zahlenkombination der verschlüsselten MAC-Adresse. Die darauffolgenden Spalten zeigen das Datum mit Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute und Sekunde (Spalte B-G). Die vorletzte Spalte (Spalte H) beinhaltet die Nummer der WiFi-Box und in der letzten Spalte (Spalte I) steht die gemessene Signalstärke in dB. So bekommt jede einzelne WiFi-Suchanfrage eines Gerätes eine eigene Zeile in dieser Datei.

In Abbildung 19 werden mit Hilfe eines Filters nur die Anfragen gezeigt, die von einem Handy (mit der aktivierter App) ausgehen. Der grün markierte Bereich enthält alle Anfragen innerhalb einer Minute (,17'). Im gelb markierten Bereich ist zu sehen, dass in einem Zeitraum von fast zwei Minuten (13 Uhr, 18 Minuten und 7 Sekunden bis 13 Uhr, 19 Minuten und 57 Sekunden) keine Anfrage von diesem Handy ausgegangen ist.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
7331	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	16	11	13	69	
7413	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	17	13	45	
7414	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	17	13	45	
7424	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	29	13	41	
7425	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	29	13	45	
7433	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	36	13	47	
7434	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	36	13	47	
7445	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	46	13	55	
7446	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	47	13	49	
7451	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	17	56	13	51	
7464	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	18	7	13	51	
7465	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	18	7	13	57	
7606	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	19	57	13	61	
7607	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	19	57	13	59	
7610	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	19	59	13	61	
7616	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	20	1	13	61	
7617	fff0b55c6c8752e655b9b4cd6827873181ecb5d5fba1fd5685b636dba8b139e3	2016	12	7	13	20	1	13	65	

Abbildung 19 Beispiel Sendehäufigkeit Probe Request mit App

Durch diesen Umstand, dass Mobiltelefone in sehr unregelmäßigen Abständen Signale senden, können hier bereits erste Schlüsse gezogen werden.

Die Sendehäufigkeit beeinflusst zunächst nicht direkt die Genauigkeit bei der Auswertung durch eine Trilateration. Doch da sich bei der Trilateration in der Praxis, nicht wie in der Theorie, nicht alle Kreise in einem Punkt schneiden, hat die Sendehäufigkeit letztlich doch Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung.

Es lässt sich jedoch mit Sicherheit sagen, dass die großen Abstände zwischen den Probe Requests das Erstellen eines genauen Bewegungsprofils unmöglich machen. In den zwei Minuten, in denen der Fußgänger nicht getrackt wird, könnte sich der Besucher beispielsweise auf dem Markt mehrere Stände angesehen haben. Diese Bewegung wäre für den Betrachter der Daten unsichtbar.

5.3.3 Dämpfung gegenüber Entfernung

In diesem Versuch soll herausgefunden werden, wie sich die Stärke des Signals bei sich verändernder Entfernung verhält. Um dies zu testen sollten sich so wenige Störeinflüsse in der Nähe befinden wie möglich. Dazu wurde dieser Test auf einem freien Feld in München-Untermenzing durchgeführt. Dort gibt es weder Reflektionen von nebenstehenden Gebäuden, noch Störungen durch Passanten oder Mobiltelefone.

Der Versuch wurde mit drei Boxen durchgeführt, um Unregelmäßigkeiten einzelner Boxen erkennen zu können. Alle drei Boxen wurden jeweils 10 m voneinander auf einer Linie aufgestellt. Die Boxen wurden erhöht ca. 250 cm vom Boden aufgestellt, um Reflektionen des Bodens zu vermindern.

Um die Signalstärke über die Entfernung zu messen, hat sich eine Testperson mit zwei Testgeräten (Mobile Stationen) mit gleichbleibender Geschwindigkeit von den aufgestellten WiFi-Boxen entfernt. Nach kurzer Pause ist die Testperson mit der gleichen Geschwindigkeit zurückgekommen. Die Strecke betrug 250 m. Dabei wurde jeweils der genaue Start- und Stopp-Zeitpunkt gemessen, um bei der Auswertung von der Zeit auf die Entfernung zurückrechnen zu können. Die Testperson hat zwei Handys benutzt, um eventuelle Unterschiede bei verschiedenen Geräten entdecken zu können. Außerdem wurden beide Handys in unterschiedlichen Stoffbeuteln möglichst weit vom Körper entfernt getragen. Es wurde darauf geachtet, dass sich der Körper der Testperson zu keiner Zeit zwischen Mobiler- und Basisstation befindet, um auch hier keine zusätzlichen Störfaktoren zu erzeugen. Dieser Test wurde viermal durchgeführt.

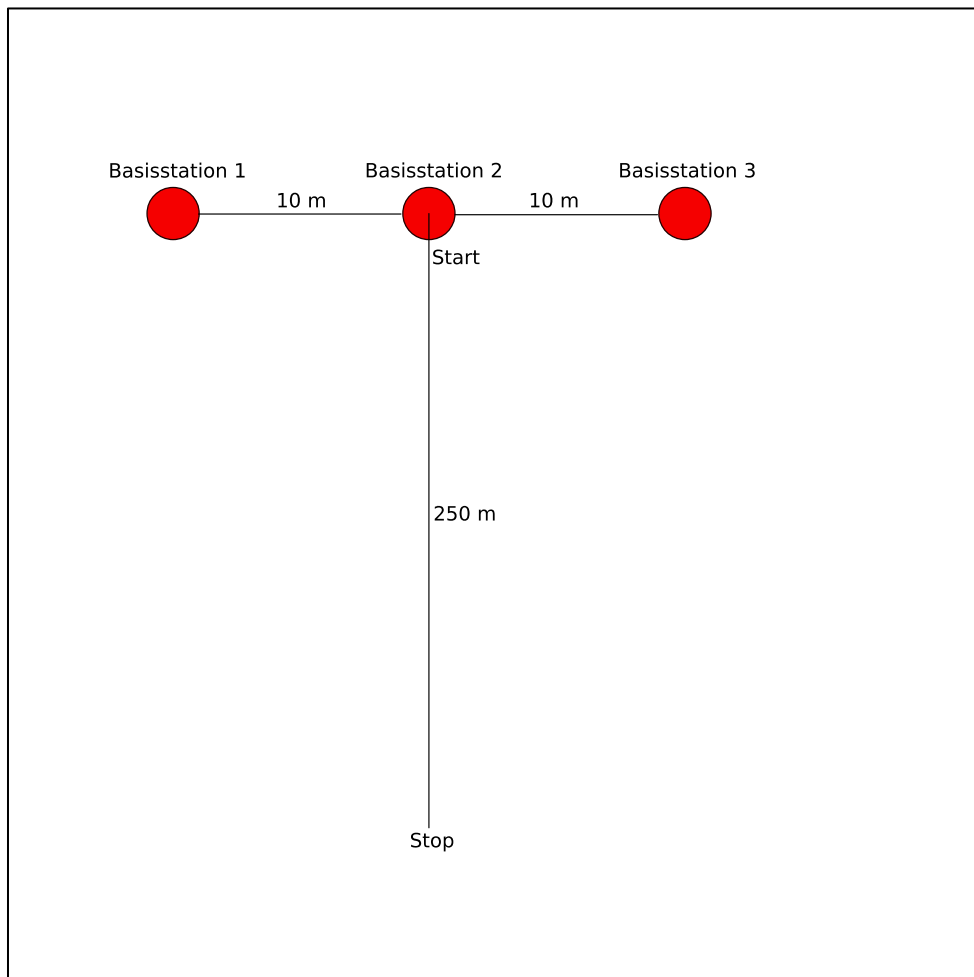


Abbildung 20 Skizze Versuchsaufbau der Signalstärke über die Entfernung

Zur Auswertung der Versuche ist eine Umrechnung von den gemessenen Signalstärken in Entfernungsmeter notwendig. Dazu wird die Formel der Freiraumdämpfung angewendet (IEEE 1997).

$$FSPL(dB) = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f) - 27.55$$

$$\Rightarrow d = 10^{\left(\frac{27.55 - (20 * \log_{10}(f) + FSPL(dB))}{20}\right)}$$

Die Frequenz f wird in der Einheit MHz angegeben und wird für WiFi als konstant 2412 MHz angenommen. Dies ist Kanal 1 aus dem Standard IEEE 802.11 für das WiFi 2.4 GHz Band (IEEE 1997).

$FSPL(dB)$ ist die Variable für die jeweils gemessene Signalstärke. Das Ergebnis d (Distanz) wird in der Einheit Meter ausgegeben.

Die in Abbildung 21 dargestellte Grafik zeigt die Auswertung der Daten aus einer der drei Basisstationen. Hier sind aus Gründen der Übersichtlichkeit beispielhaft nur vier Läufe einer Box eingezeichnet. Auf der x-Achse ist die zurückgelegte Entfernung von 0 bis 250 m angetragen und auf der y-Achse ist die Signalstärke in Dezibel (dB) zu sehen. Bei zwei der vier Testläufe wurden in gelb und blau jeweils die Trendlinien als logarithmische Funktion dargestellt, um sie mit der Linie der Freiraumdämpfung/Distanceverlustformel (Abbildung 22) vergleichen zu können.

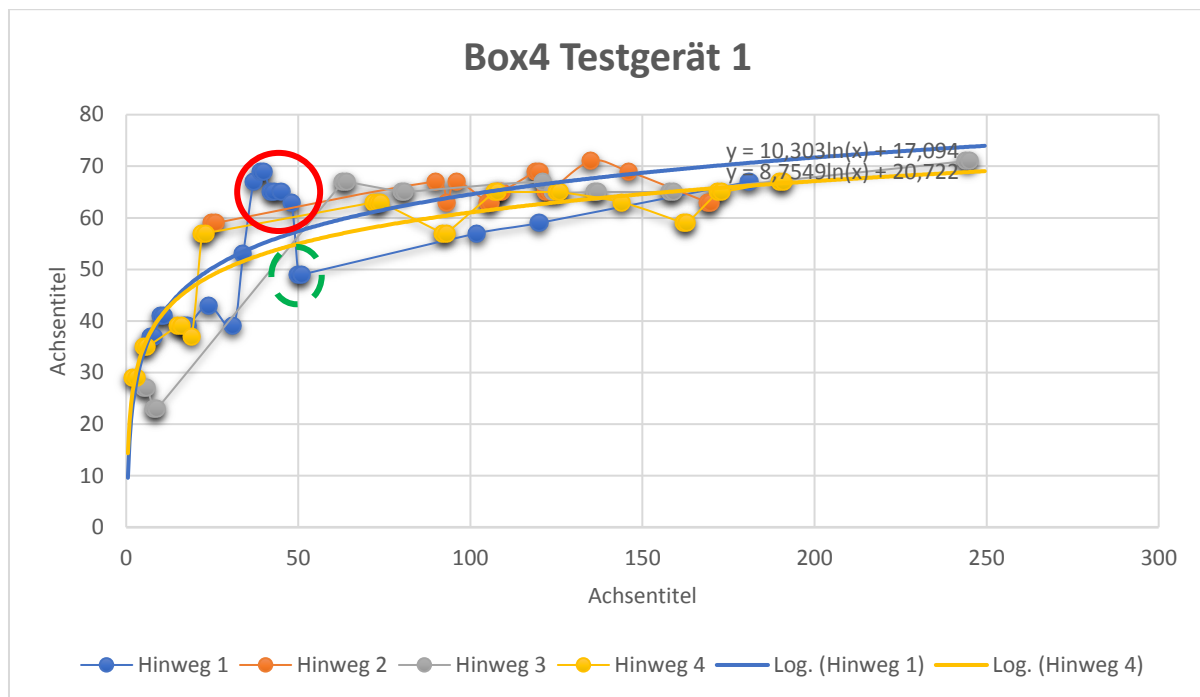


Abbildung 21 Signalstärke über die Entfernung

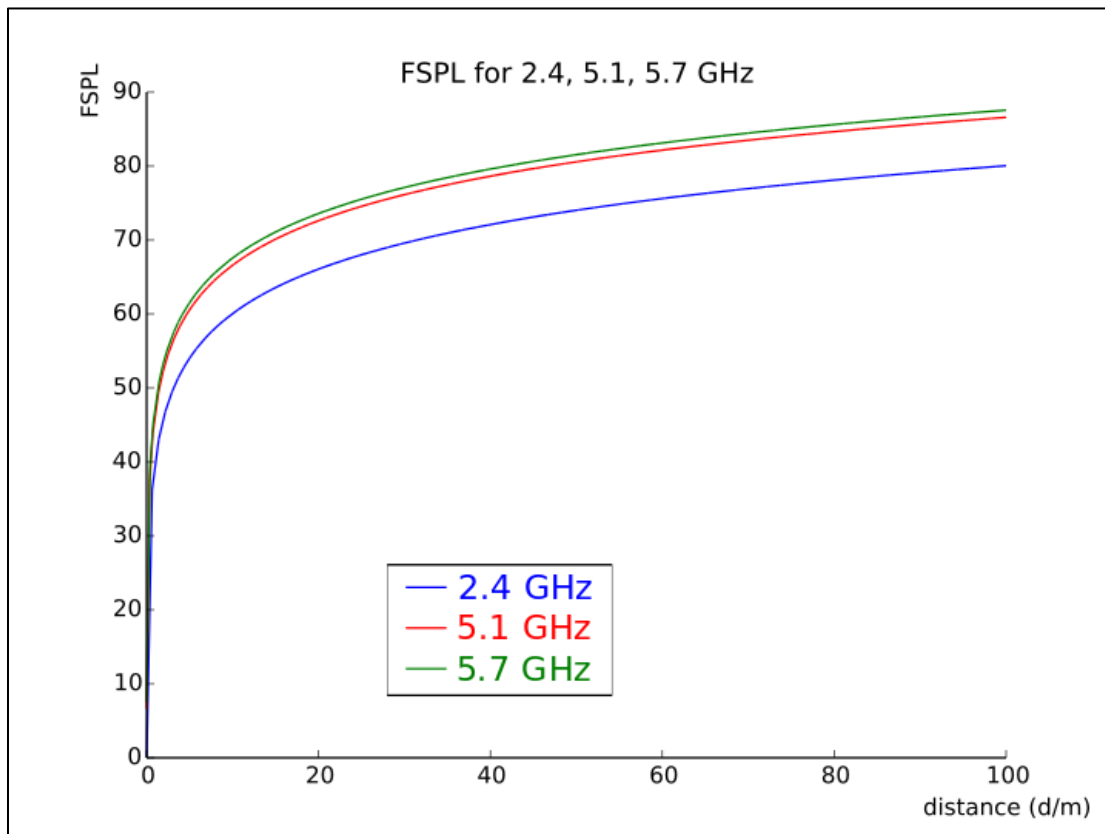


Abbildung 22 Freiraumdämpfung (FSPL_for_common_802.11_frequency_bands)

Bei der Analyse der Daten ist zu erkennen, dass die logarithmische Trendlinie (Abbildung 21) mit der Linie der Freiraumdämpfung (Abbildung 22) Ähnlichkeiten aufweist. Dass die Linie der Freiraumformel schon sehr viel früher tangiert und auch früher einen höheren Wert aus der y-Achse erreicht, liegt an den bereits erwähnten Störfaktoren.

Bei Betrachtung der blauen Trendlinie (Abbildung 21) im Vergleich mit den einzelnen blauen Stützpunkten sind im Bereich zwischen 30 und 50 Metern starke Schwankungen zu sehen. Der rot markierte Bereich weist mehrere dB Schwankungen auf. In diesem dB Bereich bedeutet eine Schwankung von 3 dB bereits mehr als 5 m Abweichung (Abbildung 23).

dB	m
62	12,4486626
63	13,9676292
64	15,6719377
65	17,5842033
66	19,7298006
67	22,1372004
68	24,8383474
69	27,8690841
70	31,2696267

Abbildung 23 Umrechnung dB in Meter

Darüber hinaus ist zu sehen, dass es einzelne Ausreißer in einer noch wesentlich höheren Größenordnung gibt (siehe grün gestrichelter Kreis in Abbildung 21). Diese Ausreißer verfälschen das Ergebnis erheblich.

Bei kurzen Entfernungen werden hohe dB-Werte aufgezeichnet (nahe 0 dB). Wegen der logarithmischen Eigenschaft der Kurve scheint es so, als würden die Schwankungen bei einer größeren Entfernung abnehmen. Diese Eigenschaft hängt jedoch nur mit der Abnahme der Signalstärke zusammen. Die Schwankungen der Signale bleiben auch bei größeren Entfernungen gleich.

Bei einem Tracking über einen sehr kurzen Zeitraum kann es zu großen Ungenauigkeiten kommen. Wie sich die Ungenauigkeiten/Schwankungen der Signalstärke über die Zeit verhalten, wird im nächsten Kapitel beschrieben.

5.3.4 Signalschwankung über die Zeit

Der Test der Signalschwankung über die Zeit dient dazu, herauszufinden, wie gleichbleibend das Signal von der Basisstation empfangen wird, während die Randbedingungen konstant bleiben. Auch hier wurde als Testumgebung ein freies Feld gewählt, um Störeinflüsse durch die Umgebung auf ein Minimum zu reduzieren.

Für diesen Versuch wurden wiederum zwei Mobiltelefone und drei Basisstationen verwendet, um eventuelle Störungen einzelner Geräte zu kompensieren und ein aussagekräftiges Ergebnis zu bekommen. Hierzu wurden sowohl Sender als auch Empfänger in ca. 250 cm Höhe aufgestellt. Die zwei Mobiltelefone wurden im Abstand von

10 m zueinander auf einer Linie positioniert. Nun wurden die RPi-Boxen (Basisstationen) im Abstand von 20, 60 und 100 m zu den Handys aufgestellt. Sie wurden so platziert, dass zwischen allen Geräten Sichtkontakt besteht und keines im Schatten eines anderen steht und keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet (Abbildung 24). In dieser Konstellation zeichneten die Geräte 15 Minuten auf. Es haben sich in dieser Zeit keine Personen im weiten Umkreis der Geräte befunden.

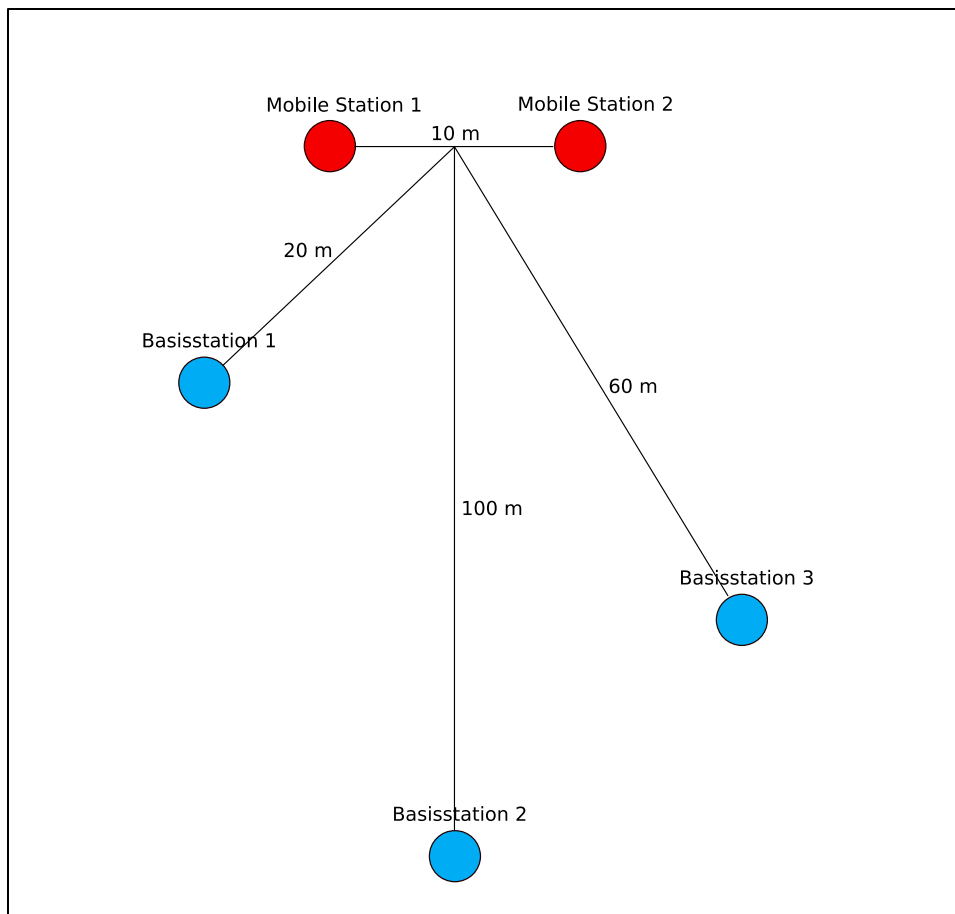


Abbildung 24 Skizze Versuchsaufbau der Signalstärke über die Zeit

Bei der Auswertung des Versuches sind die Schwankungen der Signalstärke über die Zeit in einem Excel Punktdiagramm (Abbildung 25) dargestellt. Auf der X-Achse sind die Sekunden des Tages abgetragen, auf der Y-Achse ist die Signalstärke in dB zu sehen. In der untenstehenden Grafik wurde eines der beiden Handys mit allen drei Basisstationen ausgewertet. Die Abkürzung AP in der Legende bedeutet hier Access Point und ist gleichzusetzen mit der entsprechenden Basisstation.



Abbildung 25 Signalstärke über die Zeit

Abbildung 25 zeigt, dass die empfangene Signalstärke an den Basisstationen um 6 bis 8 dB schwankt. Der AP4 in Abbildung 25 entspricht der BS1 in Abbildung 24. Bei einem gemessenen Abstand von 20 m am AP6 (BS1) wurde eine durchschnittliche Signalstärke von 62 dB gemessen, mit einer Standardabweichung von 1,7 dB.

Hier taucht ein Widerspruch zwischen gemessenem Abstand und gemessener Signalstärke auf. Nach der Freiraumformel müsste für diese Distanz ein Signalwert von 66 dB gemessen werden. In diesem Bereich entspricht eine Schwankung von 1,7 dB einem Wert von ca. 4 m (Abbildung 23). Der abweichende Mittelwert von 62 dB im Vergleich zum errechneten Wert von 66 dB ist mit Störfaktoren zu erklären. Der Absolutwert aus der Messung wird in dieser Analyse vernachlässigt.

5.3.5 Genauigkeit der GPS-Messung

Um später die Genauigkeit der WLAN-Messungen mit denen der GPS-Messungen in bewohnten Gebieten vergleichen zu können, wurde in diesem Versuch die Schwankung des GPS-Gerätes gemessen. Bei hoher Genauigkeit soll das GPS-Gerät auch zur Vermessung des Weihnachtsmarktes und der Positionen der Boxen benutzt werden.

Dazu wurde der GPS-Recorder der TU München (Abbildung 26) über den Zeitraum von 15 Minuten in einem bewohnten Gebiet, jedoch ohne Abschattungen, aufgestellt. Danach wurden bei der Auswertung der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.



Abbildung 26 GL-770 professioneller GNSS (GPS + GLONASS) Logger Recorder, tsj

Die Standardabweichung der Positionsschwankung beträgt auf dem Längengrad 0,86 m und auf dem Breitengrad 1,08 m. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert beträgt auf dem Längengrad 2,26 m und auf dem Breitengrad 5,55 m. Aus lizenzrechtlichen Gründen kann die Abweichung in Google Maps hier nicht grafisch dargestellt werden.

Auf Grund dieser hohen Ungenauigkeit können die GPS-Messungen am Markt nicht als Grundlage der Berechnungen verwendet werden. Bei späteren Stichproben der GPS-Messungen ist zu sehen, dass die Messdaten durch die hohen Gebäude um die

Münchner Freiheit herum noch ungenauer sind (teilweise mehr als 10 m Ungenauigkeit) als bei den Tests im Vorfeld.

5.4 Feldversuch ‚Weihnachtsmarkt‘ 2016

5.4.1 Schwabinger Weihnachtsmarkt 2016 an der Münchner Freiheit

Der Schwabinger Weihnachtsmarkt findet alljährlich in der Vorweihnachtszeit an der Münchner Freiheit statt. Auf Grund der großen Menschenansammlung bei solchen Veranstaltungen eignet sich ein solcher Markt sehr gut, um Fußgängerströme anhand von WiFi-Trackern zu analysieren und herauszufinden, ob und wie ein Einsatz überhaupt möglich ist. Zudem hat speziell der Schwabinger Weihnachtsmarkt durch angrenzende Parks und Straßen eine günstige geographische Lage, um eine Fußgängeranalyse durchzuführen. Hier gibt es nicht, wie bei vielen anderen Märkten, zwischen fast jedem Stand einen Eingang in das Gelände. Beispielweise durch die Abgrenzung zur Leopoldstraße befindet sich auf der Westseite des Marktes nur ein einziger Eingang. Auf den anderen Seiten befinden sich insgesamt nur 5 Eingänge, über die Besucher das Gelände betreten können. Durch diese besonderen Begebenheiten kann bei Platzierung der RPi-Boxen besonderer Fokus auf die Eingänge gelegt werden. Abbildung 27 zeigt eine Aufnahme des Marktes über dem Eingang zum Gelände von der U-Bahn Haltestelle der Münchner Freiheit. In Abbildung 28 ist der „Budenplan“ vom Veranstalter des Schwabinger Weihnachtsmarktes zu sehen.



Abbildung 27 Weihnachtsmarkt Münchner Freiheit

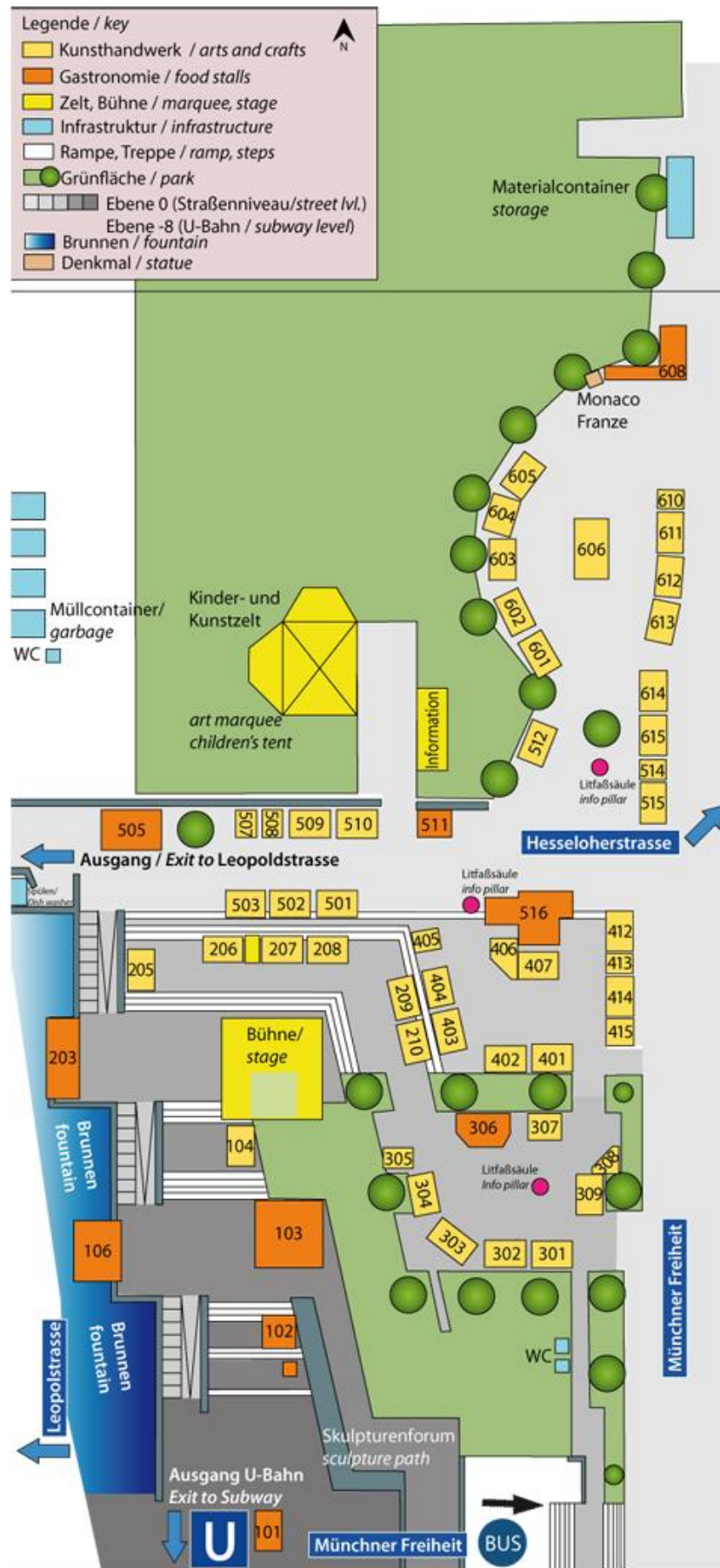


Abbildung 28 Budenplan der Veranstaltungsleitung (Schwabinger Weihnachtsmarkt an der Münchner Freiheit)

Aus Gründen der Anschaulichkeit wird in Abbildung 29 das Gebiet des Weihnachtsmarkts auf einer OpenStreetMap Karte markiert.

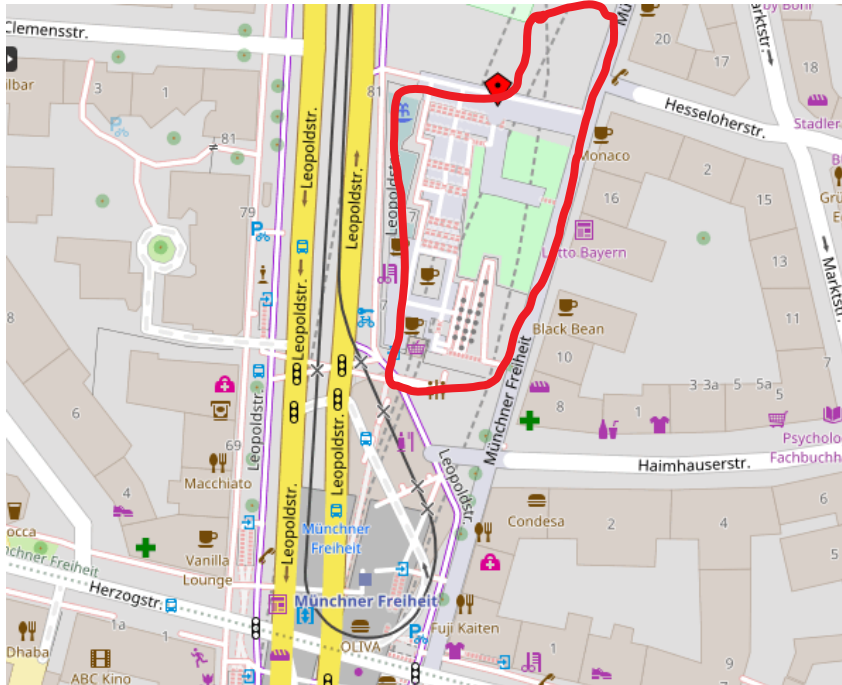


Abbildung 29 OpenStreetMap Münchner Freiheit (Openstreetmap)

5.4.2 Platzierung der WiFi-Boxen

Die optimale Verteilung und Platzierung der Boxen ist von großer Bedeutung. Es sollte darauf geachtet werden, dass ein Passant an jedem Punkt auf dem Gelände mindestens drei Basisstationen in seiner näheren Umgebung hat. Im Optimalfall besteht Sichtkontakt zu all diesen Stationen, da jedes Hindernis die Stärke des Signals verfälscht und somit die Auswertung später ein ungenaues Ergebnis liefert. Auf dem Schwabinger Weihnachtsmarkt wurden 11 Boxen nach Abbildung 30 verteilt.

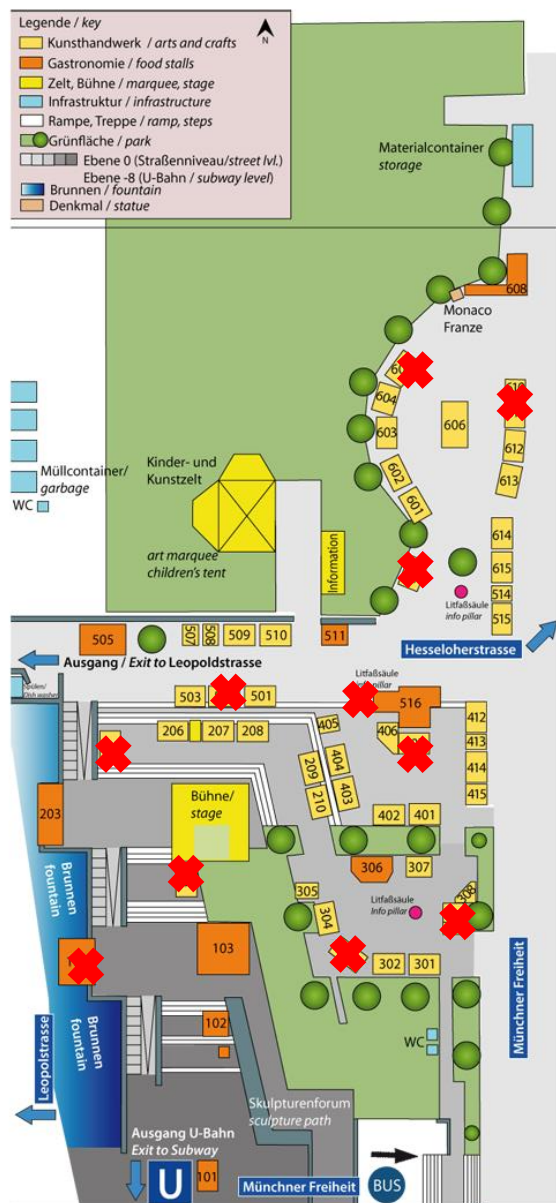


Abbildung 30 Budenplan mit RPi-Positionen (Schwabinger Weihnachtsmarkt an der Münchner Freiheit)

Die Boxen wurden an jedem Tag exakt auf die gleichen Positionen gestellt. Sie wurden erhöht auf den Buden des Marktes oder auf Informationssäulen platziert, um sie vor Diebstahl zu schützen. Außerdem werden durch die erhöhte Lage auf ca. 2,5 m die Störungen durch Passanten vermindert. So haben nicht nur die ersten Personen neben der Box direkten Sichtkontakt, sondern auch die Signale der Telefone von Menschen, die sich etwas weiter entfernt befinden, werden weniger abgeschirmt. Diese Details wurden alle im Vorfeld mit der Veranstaltungsleitung abgesprochen und genehmigt (mündlich ausgesprochene Genehmigung des Veranstalters am 02.12.2016).

Abbildung 31 zeigt ein Beispiel, wie die WiFi-Boxen auf Erhöhungen platziert wurden. Zum Schutz vor Verschmutzung und Wind wurden die Boxen mit einer schwarzen Plastiktüte umhüllt und mit Klebeband befestigt.



Abbildung 31 Beispiel Platzierung WiFi-Boxen (in schwarzer Plastiktüte)

5.4.3 Durchführung/Ablauf

Der Ablauf der Feldversuche erfolgte an allen Messtagen nach dem gleichen Schema. Der Aufbau der Messgeräte findet jeweils vor Eröffnung des Marktes zwischen

11:30 Uhr und 12:00 Uhr statt. Durch die lange Akkulaufzeit können die RPi's bereits vor Ankunft am Markt witterungsunabhängig per Laptop angeschaltet werden. So müssen die fertig verpackten und eingeschalteten Boxen vor Ort nur noch mit einer Leiter auf den Dächern der Buden aufgestellt werden. Dadurch werden die Budeninhaber nur minimal bei ihren eigenen Aufbauarbeiten gestört und selbst schlechte Witterungsbedingungen stören die Funktionalität der luftdicht verschlossenen Boxen nicht.

Während die Boxen platziert werden, wird jeweils die Position mit einem GPS-Gerät vermessen. Um den Überblick bei der Positionierung und der Vermessung nicht zu verlieren ist es nützlich, jeweils Listen zu erstellen und die Positionen einzutragen. Hier muss auch der Zeitpunkt, an dem die Messungen anfangen und an dem sie enden eingetragen werden, um später alle Werte außerhalb dieses Zeitraums herausrechnen zu können.

Auf Grund der Ungenauigkeiten durch GPS (siehe Kapitel Genauigkeit der GPS-Messung) wurde der Versuchsbereich zusätzlich mit Bandmaß vermessen. Durch diese Vermessungen konnte ein relatives Koordinatensystem mit hoher Genauigkeit erstellt werden.

Die WiFi-Boxen laufen während der Aufnahme autonom. In dieser Zeit wurden unter anderem Referenzmessungen vorgenommen.

Abends wurden die Boxen wieder eingesammelt und abgeschaltet. So wurden an jedem Messtag ca. 7 Stunden Daten aufgenommen. Die gespeicherten Daten müssen nicht vor Ort auf einen Computer übertragen werden, sondern können zeit- und witterungsunabhängig extern gespeichert und analysiert werden.

5.4.4 Auswertung

Ausgangslage für die Auswertung der Feldversuche am Schwabinger Weihnachtsmarkt waren die gesamten Daten von allen 11 WiFi-Boxen, die an 4 Messtagen aufgenommen wurden.

5.4.4.1 Informationen zur Software

Um die Daten später in Excel weiterverarbeiten und visualisieren zu können, erfolgte die Aufbereitung der Daten in der Programmiersprache Python. Um die vorgegebene Zeit dieser Arbeit nicht zu überschreiten und trotzdem verwertbare Ergebnisse generieren zu können, wurden Skripte in Python zur Vorverarbeitung der Daten programmiert. Die Programmierung übernahm Herr Wolfgang Rostek (Rostek 2017).

Die Grundfunktionen zur Aufzeichnung waren auf dem RPi vorhanden. Sie wurden in früheren Arbeiten des Lehrstuhls ebenfalls in der Programmiersprache Python entwickelt (Peter Kielar n.d.)

Dieses Skript (`wifiscan.py`) startet auf dem RPi einen WLAN Router. Alle erfassten Daten werden in CSV Format in Dateien geschrieben. Jede Zeile entspricht der Anfrage eines Handys nach Suche von Routern (Probe Request).

In diesem Request gibt das Handy seine MAC Adresse bekannt. Diese ist Gerätebezogen eindeutig und daher aus Datenschutzgründen sensibel (siehe Erläuterungen Kapitel Rechtliche Grundlagen). Die Software generiert mit einer Hashfunktion eine neue Identifikation. Diese ist nicht mehr auf das Gerät zurückzuschließen, ermöglicht aber während der Aufzeichnung die Zuordnung von Anfragen an die Router vom gleichen Handy. Nur die generierte Identifikation wird in der Datei aufgezeichnet.

Nach ersten Tests mit diesem Skript und im Vorfeld der Feldversuche wurden einige Überlegungen angestellt.

- Nach Aufzeichnung der Daten: wie sieht die spätere Auswertung aus?
- Es ist eine umfangreiche Sammlung von Rohdaten zu erwarten. Kann diese Auswertung wie geplant in Excel stattfinden?

Nachdem sich ein erstes Bild für die vorgesehenen Feldversuche und deren Analyse herauskristallisierte, wurden entsprechende Funktionen in Excel angedacht.

Es zeichnete sich ab, dass eine Auswertung nur mit Excel Mitteln zwar möglich wäre, aber sehr umfangreiche Excel Makros erfordern würde.

Als Alternative bot sich eine Zweiteilung der Analyse an.

Die Funktionen für die Datenaufbereitung können besser in einer Programmierumgebung wie Python realisiert werden. Von Excel können die mächtigeren Funktionen zur

Filterung, Sortierung und Visualisierung der aufbereiteten Daten (Charts) genutzt werden.

5.4.4.2 Trilateration – Referenzmessungen

Wie bereits beschrieben wurden im Versuchsgelände 11 Referenzpunkte festgelegt. Die Punkte wurden mit Blickrichtung und genauer Haltung des Mobiltelefons im Vorfeld festgelegt und per Foto dokumentiert, um eine genaue Kopie dieser Referenzmessung an mehreren Tagen durchführen zu können (Abbildung 32,Abbildung 33).



Abbildung 32 Beispielbild für Referenzmessungen Daniel Biedermann



Abbildung 33 Beispielbild für Referenzmessungen Daniel Biedermann

Die Referenzpunkte wurden neben der Dokumentation per Foto auch mit GPS und mit Maßband vermessen. Es wurde im Vorfeld bewusst entschieden diese 11 Punkte anzulaufen und keine vorgegebene Route in einer bestimmten Zeit zurückzulegen. Grund hierfür ist die einfachere Durchführbarkeit. Da sich auf einem Weihnachtsmarkt sehr viele Menschen bewegen, ist es unmöglich diese Route genau einzuhalten. Bei den 11 Punkten wurden jeweils die Ankunftszeiten und die Endzeiten notiert, an der sich die testende Person am jeweiligen Punkt aufhält. So kann später händisch herausgelesen werden, welche Werte während dieser Zeit vom Referenztelefon aufgenommen wurden.

Die nachfolgende Grafik zeigt die mit Maßband ermittelten Positionen der Referenzpunkte. Da der Bodenplan nicht maßstabsgetreu ist und kein Luftbild zur Verfügung steht, wird die Karte mit den Basisstationen (Orange) und Referenzpunkte (Blau) in einem relativen Koordinatensystem dargestellt (Abbildung 34).

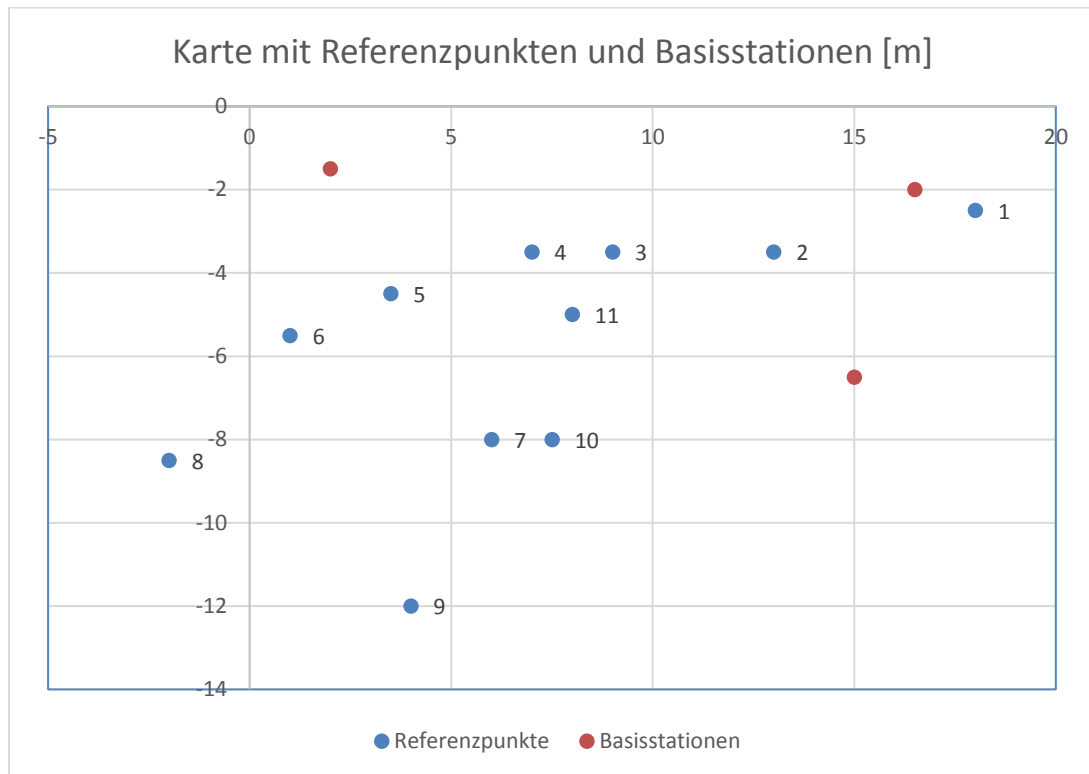


Abbildung 34 Karte mit Referenzpunkten und Basisstationen

Zum Vergleich und zur besseren Orientierung ist in Abbildung 35 der Budenplan (nicht maßstabsgetreu) von der Veranstaltungsleitung dargestellt. Hier sind die Positionen der Basisstationen rot markiert und die Positionen der Referenzpunkt blau.

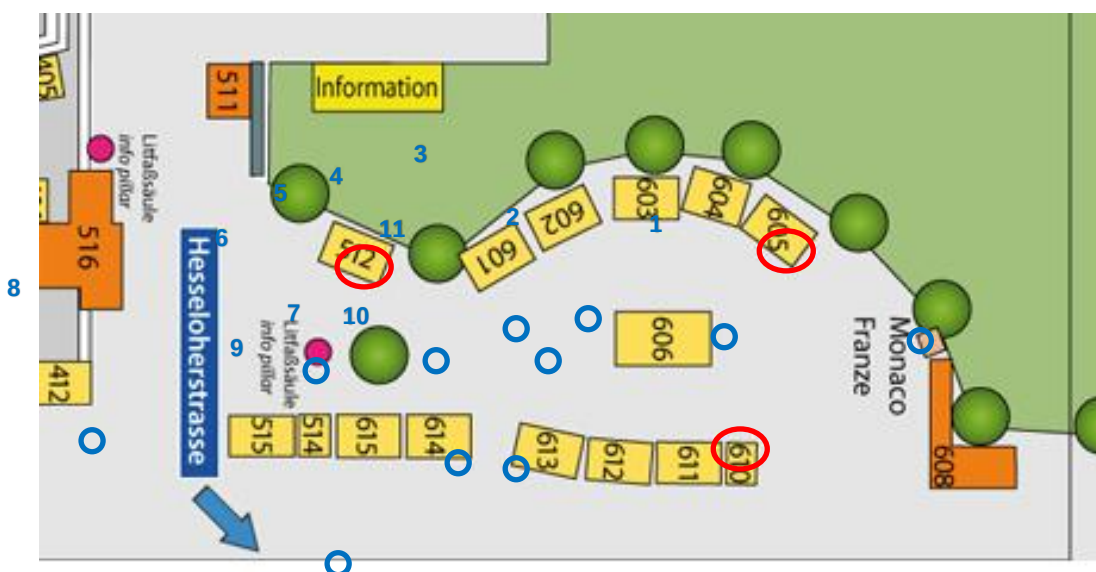


Abbildung 35 Budenplan nicht maßstabsgetreu

Mit der oben beschriebenen Software wurden die WiFi-Daten per Trilateration ausgewertet. Herausgefiltert wurden die Werte des Handys an den Referenzpunkten.

Die Trilateration funktioniert in der Praxis nicht so, wie es in den oberen Kapiteln der theoretischen Grundlagen beschrieben wurde. Wie bereits in den Vorversuchen festgestellt wurde, schwanken die Signalstärken. So wird es den Fall nur zufällig geben, dass sich die Kreise der drei Messpunkte bei der Trilateration genau in einem Punkt schneiden. Vielmehr ist es der Fall, dass sich die aus den Signalstärken umgerechneten Kreisradien entweder gar nicht schneiden, oder überlappen.

Bei überlappenden Kreisen mit je zwei Schnittpunkten muss der Mittelpunkt aller Geraden durch diese zwei Schnittpunkte gefunden werden. Die Geraden schneiden sich genau in einem Punkt. Es genügt für die Berechnung den Schwerpunkt aller Schnittpunkte zu bestimmen. Dies entspricht dem geometrischen Mittel der Kreisschnittpunkte (Abbildung 36).

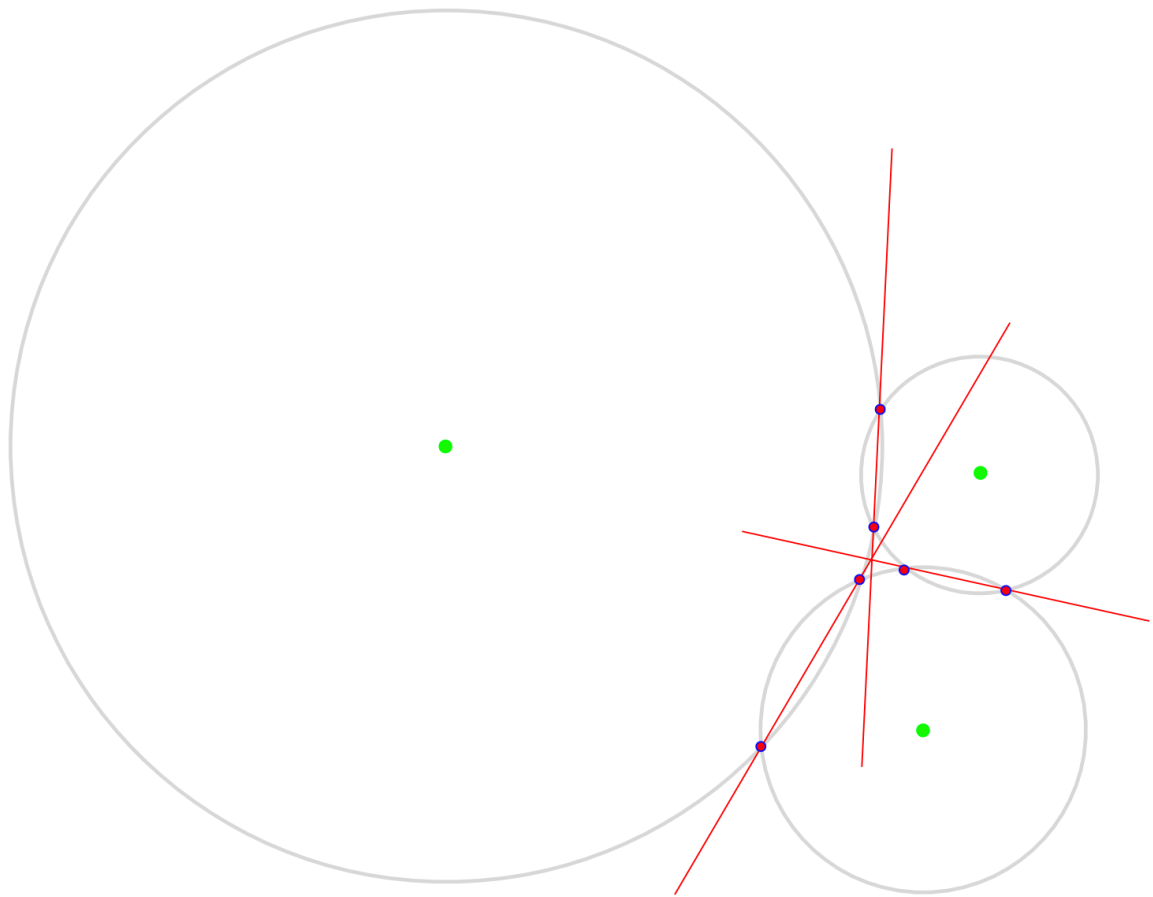


Abbildung 36 Skizze Trilateration

Die Trilateration wurde mit diesem Verfahren für alle Messtage am Markt durchgerechnet. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Ergebnisse von einem Messtag für jeweils einen Referenzpunkt. Abbildung 37 zeigt den Referenzpunkt 11 und die Abbildung 38 die Ergebnisse des Referenzpunktes 8.

Karte mit Referenzpunkt 11 und Basisstationen 16.12.02

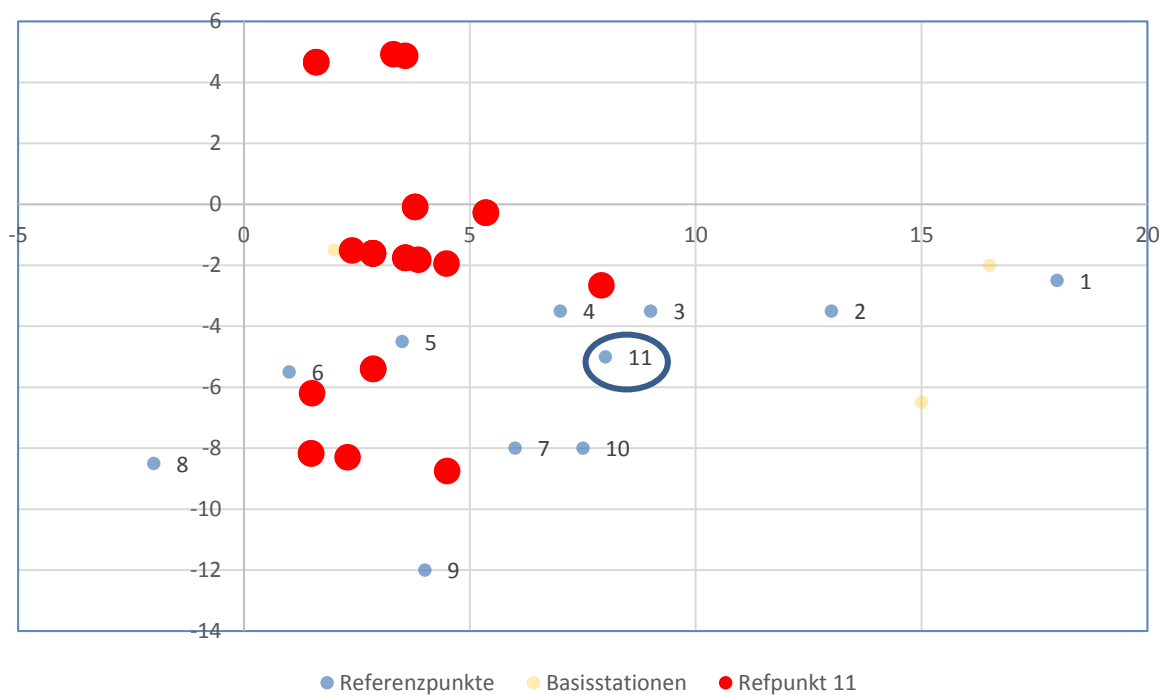


Abbildung 37 Trilateration Ref. 11

Karte mit Referenzpunkt 8 und Basisstationen 16.12.02

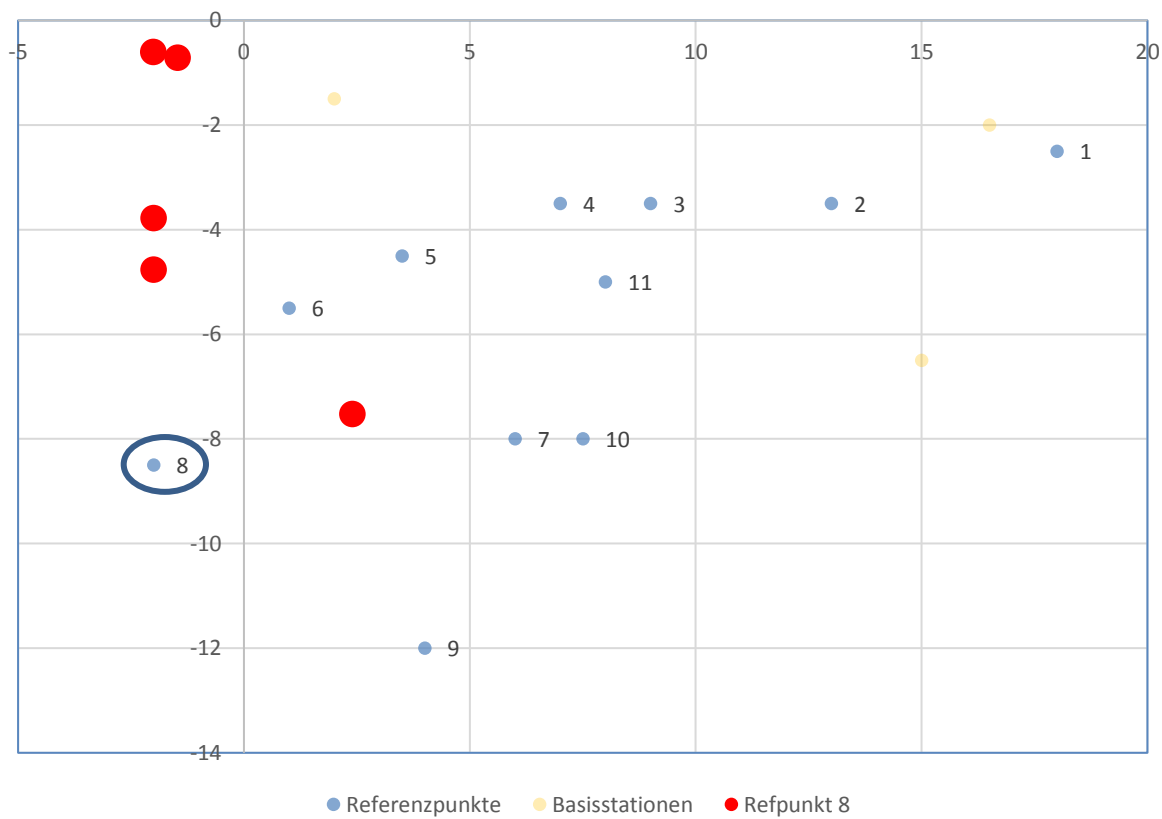


Abbildung 38 Trilateration Ref. 8

Die ausgewerteten Ergebnisse zeigen eine große Streuung. Auch gruppieren sich die Ergebnisse nicht um ihren Referenzpunkt (blau markiert). Wie bereits in den Vorversuchen herausgefunden wurde, schwanken die beteiligten Parameter erheblich. Welcher Parameter in welcher Form das Ergebnis verschlechtert ist in diesem Feldversuch nicht bestimmbar. In den oberen Kapiteln wurde bereits auf die Signalschwankungen und die Störfaktoren eingegangen.

Desweiteren fällt die unerwartet geringe Anzahl an Ergebnissen auf. Wie schon im Kapitel Sendehäufigkeit der Testgeräte festgestellt wurde, senden die Handys den Probe Request nicht wie erwartet im Sekundentakt. Zur Zeit der Datenaufnahme der Referenzmessungen wurde von einer deutlich höheren Sendehäufigkeit des Probe Requests ausgegangen.

Um mehr Ergebnisse zu generieren wird versucht, auch aus den Messungen, bei denen sich nicht alle drei Kreise schneiden, weitere Punkte zu erzeugen. Dies wird durch Skalierung der Distanzformel erreicht. Dieses Vorgehen wird nachfolgend erklärt.

Es werden alle Kreise schrittweise um einen geringen Faktor (Scale) vergrößert, oder verkleinert. Dabei wird herausgefunden, bei welcher Konstellation am meisten verwertbare Ergebnisse (Schnittpunkte der Kreise) entstehen. Mit dieser Berechnungsweise können nun mehr Ergebnisse generiert werden.

In Abbildung 39 ist dieses Verfahren bildlich dargestellt. Hier sind beispielhaft die Faktoren 0,8 (grüner Kreis) und 1,1 (roter Kreis) für den ersten Schritt der Skalierung eingezeichnet. Die eingelesenen Werte werden in der Freiraumformel um einen kleinen dB-Faktor verändert. Die Abstufung erfolgt in kleinen Schritten, was eine große Anzahl an Rechenläufen erfordert, um sicher die optimale Skalierung herauszufinden.

In diesem einfachen Beispiel ist zu erkennen, dass sich, sowohl bei der Betrachtung der grünen Kreise, als auch bei der Betrachtung der schwarzen Kreise nicht alle drei Kreise schneiden. So würde bei der Berechnung dieses Beispiels ein Scale-Faktor herausgefunden werden, der nahe am Wert 1,1 liegt. Es ist schon in der Skizze zu erkennen, dass sich die roten Kreise alle drei schneiden und zufällig nahe an den Optimalfall herankommen, in dem sich alle Geraden in einem Punkt schneiden.

In der Freiraumformel ist kein multiplikativer Faktor zu verwenden, sondern im dB-Bereich müssen Werte addiert werden.

Angemerkt werden muss, dass für jeden Referenzpunkt ein anderer Skalierungsfaktor das optimale Ergebnis liefert. Dies liegt darin begründet, dass im Versuchsgelände die Signalausbreitung abhängig vom Ort unterschiedlich verfälscht wird.

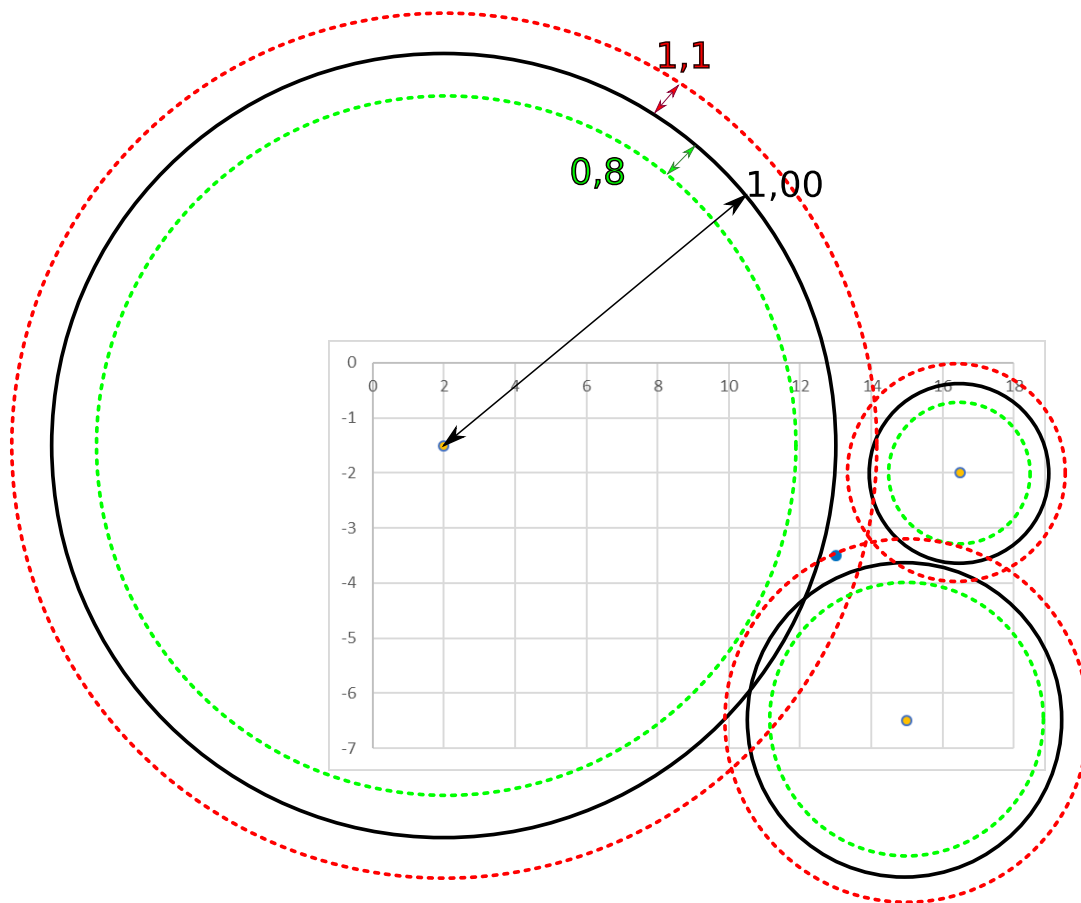


Abbildung 39 Trilateration Scale-Faktoren

Die Auswertung über alle Tage mit Skalierungsfaktoren generierte bis zu doppelt so viele Messpunkte.

Es gibt keinen optimalen Skalierungsfaktor. Jedes Szenario liefert die meisten Ergebnisse mit einem anderen Faktor.

Die größere Anzahl an Ergebnissen hat aber keine entsprechende Verbesserung der Genauigkeit zur Folge. Es bleibt bei einer großen Streuung.

5.4.4.3 Gesamtbesucheranzahl

Für die Betreiber des Weihnachtsmarktes ist es wichtig herauszufinden, wie viele Besucher ihren Markt täglich besuchen und wie lange die Besucher auf dem Markt verweilen. Diese Informationen sind sehr hilfreich, um die Planung des Marktes für das nächste Jahr zu optimieren und eventuelle Änderungen vorzunehmen. Dafür wurde die Zeit gemessen, in welcher der erste Probe Request von einer der Basisstationen gemessen wurde, bis zu dem Zeitpunkt, an dem die letzte Anfrage gesendet wurde. So können die Besucher des Marktes anhand ihrer Verweildauer ausgewertet werden.

Mit dieser Technik wurden jedoch alle Anfragen von allen Geräten in der Reichweite der Router aufgenommen. Es wurden also auch Anfragen aufgezeichnet, wenn zufällig ein Auto an der Ampel der Münchner Freiheit stand und in diesem Zeitraum einen Probe Request sendete. Um diese Signale, die nicht von Besuchern des Marktes gesendet wurden, herauszurechnen, wurden bei der Auswertung der Daten nur Mobile Stationen gemessen, die sich länger als fünf Minuten in der Reichweite der Basisstationen aufgehalten haben.

Um Störfaktoren in der anderen Richtung herauszunehmen, wurde mit der Annahme gearbeitet, dass sich Besucher nicht länger als 3 Stunden auf dem Markt aufhalten. Damit fallen hauptsächlich die Betreiber der Stände aus dem Raster, da diese den ganzen Tag vor Ort sind und nicht zu den Besuchern zählen. Die Messdauer betrug täglich jeweils 7 Stunden.

Beispielhaft ist in Abbildung 40 die Gesamtbesucheranzahl am Sonntag den 18.12.2016 abgebildet. Es wird der Sonntag herausgenommen, da hier mit Abstand am meisten Personen den Markt besucht haben.

Die Grafiken sind Diagramme, die sich in fortlaufender x-Richtung aufsummieren. Unterteilt sind die Abschnitte in x-Richtung in 5 Minuten Intervalle. So kann abgelesen werden, wie viele Personen den Markt mindestens n Minuten besucht haben. Beispielsweise haben am Sonntag den 18.12.2016 1489 Personen (Abbildung 40, rot umrandet) den Markt mindestens 60 Minuten besucht.

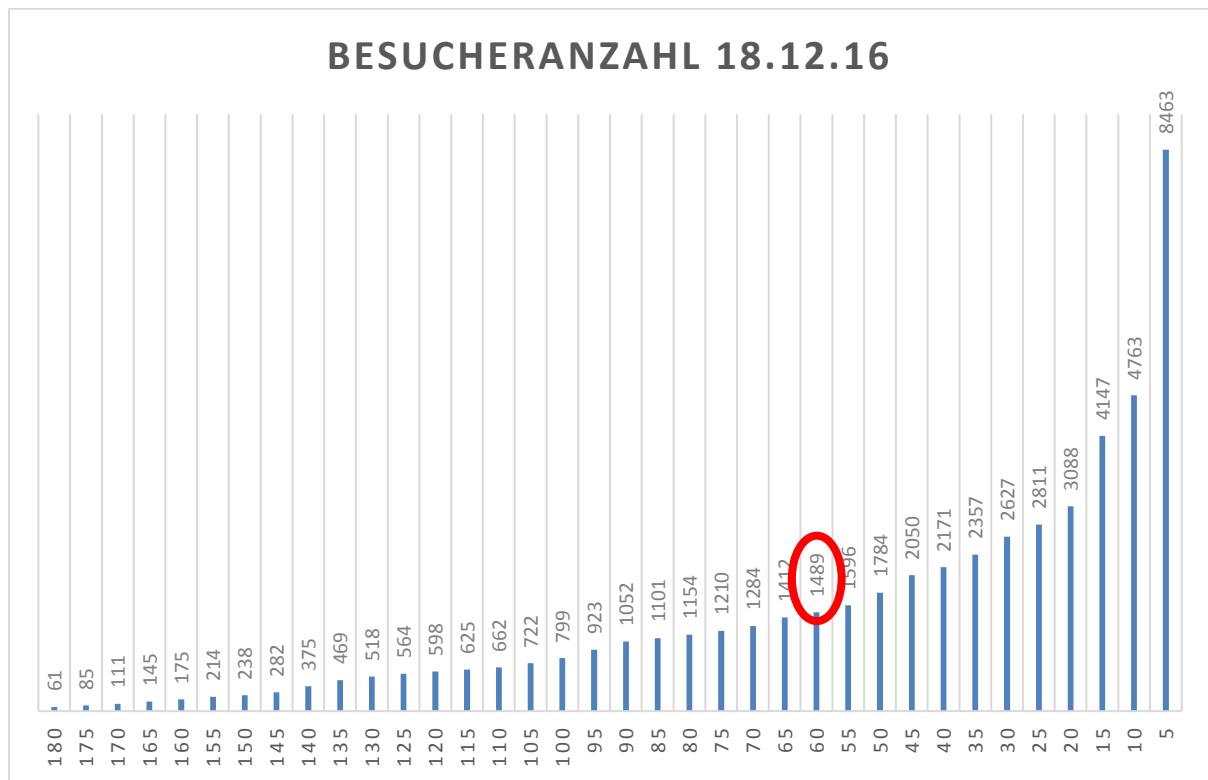


Abbildung 40 Besucheranzahl Sonntag

Um die Verteilung der Besucher über die verschiedenen Tage darzustellen sind in Abbildung 41 alle Werte der 4 Messtage im Diagramm eingetragen.

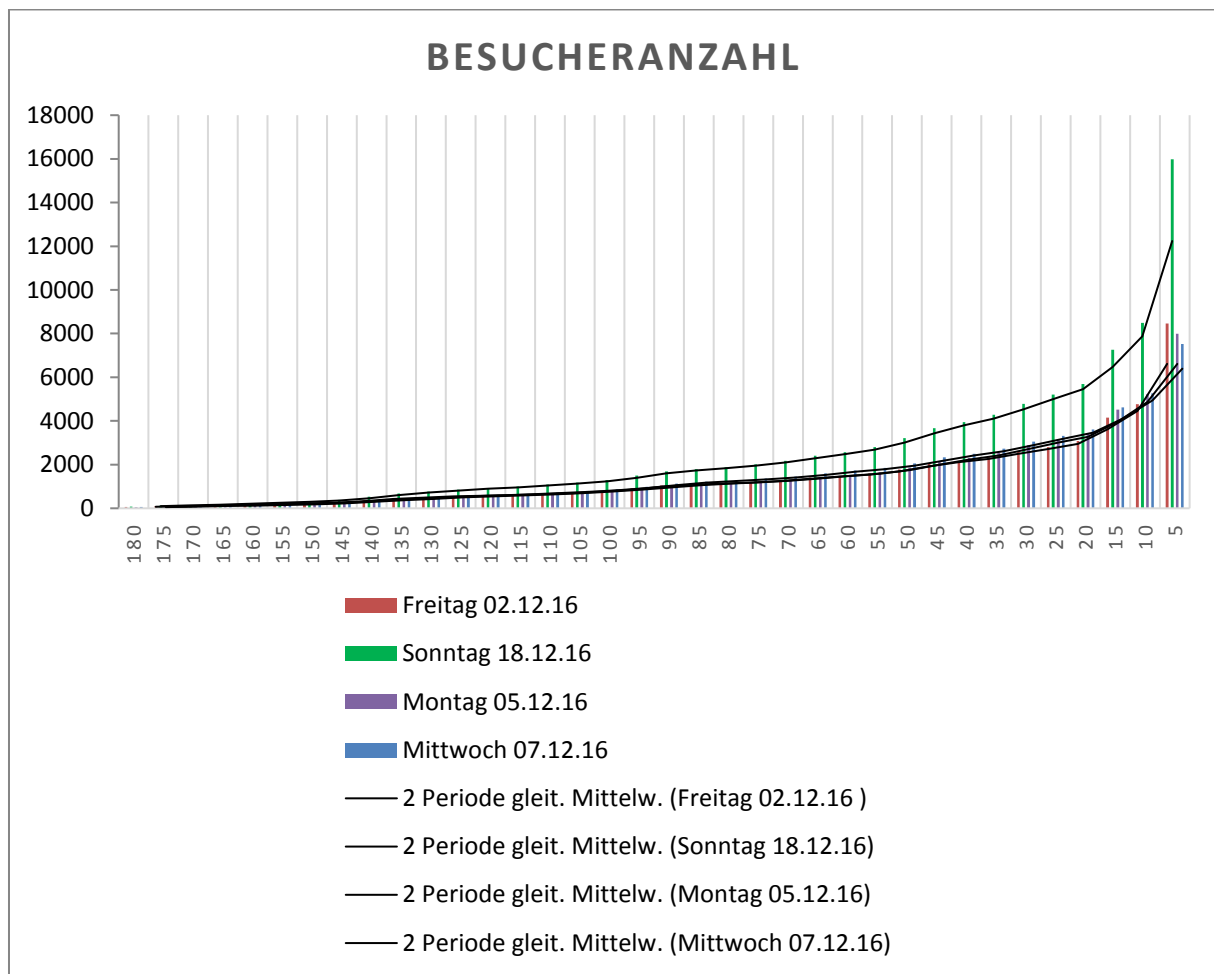


Abbildung 41 Besucheranzahl Übersicht über alle Messtage

Hier ist zu sehen, dass sonntags mit Abstand die meisten Besucher den Markt besuchen. An den anderen Wochentagen ist die Besucheranzahl ungefähr gleich.

5.4.4.4 WiFi-Abdeckung

Der Versuch der WiFi Abdeckung dient dazu herauszufinden, wie viel Prozent der Passanten die automatische WLAN-Suchfunktion eingeschaltet haben. Da nur Personen von den WiFi-Trackern erkannt werden, die diese Funktion eingeschaltet haben, gibt dieser Versuch auch einen Hinweis auf die Aussagekraft des WiFi-Trackings.

Hier wird in einem abgegrenzten Bereich des Marktes in einem bestimmten Zeitraum der Besucherstrom zusätzlich zu den Messungen per RPi's auch noch händisch gemessen. Diese händischen Messungen erfolgen durch eine App (PedCounter), die

prinzipiell wie ein manueller Klicker funktioniert. Bei jedem Klick wird ein Zeitstempel gesetzt.

Als Ort wurde ein kleiner Bereich des Schwabinger Weihnachtsmarkts gewählt, an dem es nur drei Eingänge gibt. Hier wurden an jedem Eingang jeweils zwei mit der App ausgestatteten Helfer platziert, die jedes Mal einen Zeitstempel in der App setzen, wenn eine Person den Markt betritt oder verlässt. Es wurde zu Beginn der Messung einmal gezählt, wie viele Personen sich innerhalb des Bereiches befinden und dann wurde eine Stunde lang der Zu- und Abfluss des Besucherstroms gemessen. So lässt sich händisch zählen, wie viele Personen den Markt tatsächlich betreten oder verlassen haben.

Die Trilateration kann aus weiter oben genannten Gründen keine zuverlässige Standortbestimmung leisten. Aus diesem Grund wird der in Frage kommende Bereich durch Auswahl von Routern mit bestimmten Schwellwerten passend für diesen Bereich herausgefiltert.

Aus den Versuchen der Dämpfung gegenüber Entfernung wurde herausgelesen, dass die Router bei einer Entfernung von 30 Metern Signalstärken bis ca. 50 dB messen. Der Bereich in dem die Messungen gemacht wurden ist an jedem Punkt innerhalb des Bereichs höchstens 30 Meter von jeder BS entfernt. Durch diese Bedingung wurde festgelegt, dass nur Signale unter 50 dB in die Zählung aufgenommen werden.

Die Messungen zeigen, dass in der gemessenen Zeit 570 Mobiltelefone Probe Requests in diesem Bereich gesendet haben.

Die händischen Messungen ergaben, dass sich in der gemessenen Zeit, 682 Personen aus dem Messsbereich entfernt haben (outflow) und 663 Personen den Bereich betreten haben (inflow). Am Anfang haben sich 50 Personen im Testgebiet befunden.

Bei einer tatsächlich gemessenen Zahl von ca. 700 Personen im Messgelände und 570 gemessenen Probe Requests, ergibt sich eine WiFi-Abdeckung von 81,43 Prozent.

Die Versuchsergebnisse der vorherigen Untersuchungen relativieren die Genauigkeit dieses Versuches, da die schwankenden Signalstärken und die Menge an Störfaktoren das Ergebnis verfälschen.

6 Ausblick

Die Genauigkeit bei der Auswertung der Daten beim WLAN-Tracking hängt von sehr vielen unterschiedlichen Faktoren ab. In zukünftigen Versuchen ist es interessant im Detail herauszufinden, welche der Faktoren welchen Einfluss auf das Ergebnis haben.

Zunächst können Verbesserungen auf der Empfangsseite untersucht werden. Eine qualitativ hochwertige Antenne wird bessere Messergebnisse liefern.

Der Einfluss auf die Sendeseite (Mobilgeräte) ist begrenzt. Die Leistung der Sender ist herstellerabhängig und daher nicht beeinflussbar. Auf Grund der asymmetrischen Bauform der Handys und wie es am Körper getragen wird, strahlen die Handys unterschiedlich stark in verschiedene Richtungen.

Zur Vermessung des Versuchsgeländes könnte ein Differential-GPS (DGPS) genutzt werden, um die Positionen auf wenige cm genau zu bestimmen.

Rechnerisch könnte noch weiter mit den Skalierungsfaktoren und deren Auswirkungen in der Freiraumformel experimentiert werden. Durch eine größere Anzahl an Messungen kann die Qualität der Auswertung gesteigert werden.

Eine genaue Vorbereitung der Feldstudien und der WLAN-Boxen hat sich bewährt. Die akribische Sicherung der Daten, mit genauer Kennzeichnung über Ort und Zeit, hat sich ebenso als unverzichtbar erwiesen.

Literaturverzeichnis

- Badea, Vlad, and Rikard Eriksson. 2005. "Indoor Navigation with Pseudolites (Fake GPS Sat.)."
- constant signal strength of a 802.11 probe request. 2017. Accessed January 5.
<http://stackoverflow.com/questions/41448981/constant-signal-strength-of-a-802-11-probe-request>
- Dipl.-Inf. (FH) Peter Kielar. n.d. , M.Sc., Research Assistant, Python Programm: wifiscan.py
- Dipl.-Ing. Wolfgang Rostek 2017, Python Skripte auf CD
- Dornbusch, P, and M. Zündt. 2002. "Realisierung von Positionsordnungen in WLAN." *ITG-Fachtagung "Technologie Und Anwendungen Für Die Mobile Informationsgesellschaft,"* 3–9.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Realisierung+v on+Positionsordnungen+in+WLAN#0>.
- Electromagnetic_spectrum_c.svg. n.d.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Electromagnetic_spectrum_c.svg/800px-Electromagnetic_spectrum_c.svg.png
- Frequency_reuse. n.d.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=100&offset=0&profile=default&search=GSM+cell+&uselang=de&searchToken=cpagdhvmcpa1281cgnqddvbn1#/media/File:Frequency_reuse.png
- FSPL_for_common_802.11_frequency_bands. n.d.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FSPL_for_common_802.11_frequency_bands.svg
- Fuchs, Jochen G. 2013. "Kunden-Tracking: Smartphone Als Datenquelle Im Deutschen Einzelhandel." *t3n News*.
- Fussgängerströme — AnyLogic Simulationssoftware." 2017. Accessed February 1.
<http://www.anylogic.de/consulting/pedestrian-traffic-flows>.
- "Garmin | What Is GPS?" 2017. Accessed January 17.
<http://www8.garmin.com/aboutGPS/>.
- Gleim, Daniel. 2012. "Sensorgestützte WLAN-Positionsbestimmung Durch Maschinelle Lernverfahren Zur Effizienten Indoor Navigation," no. 6052405.
<https://vsis-www.informatik.uni-hamburg.de/getDoc.php/thesis/671/WLAN-Positionsbestimmung.pdf>.
- gps-differential-correction. n.d. <https://openclipart.org/detail/191678/gps-differential-correction>

- GPS-3D-trilateration. n.d.
https://openclipart.org/image/2400px/svg_to_png/191659/GPS-3D-trilateration.png
- Hitzler, Ronald. 2011. Eventisierung des Urbanen. *Eventisierung*.
- IEEE Wireless LANs, IEEE Standard 802.11, 1997
- King, Th., Th. Haenselmann, S. Kopf, and W. Effelsberg. 2006. "Positionierung Mit Wireless-LAN Und Bluetooth." *PIK - Praxis Der Informationsverarbeitung Und Kommunikation* 29 (1): 9–17. doi:10.1515/PIKO.2006.9.
- Köppe, Diplom-Informatiker Enrico. 2014. "Lokalisierung Sich Bewegender Objekte Innerhalb Und Außerhalb von Gebäuden."
- Leistungsdichte. n.d.
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/44/Leistungsdichte.png/220px-Leistungsdichte.png>
- "Love Parade: Ermittler Legen Richtern Beschwerde Vor - SPIEGEL ONLINE." 2017. Accessed March 13. <http://www.spiegel.de/panorama/justiz/love-parade-ermittler-reichen-beschwerde-beim-olg-ein-a-1112457.html>.
- Müller, Stephan. 2004. "Positionierung Im WLAN." *Project Work Locationbased Services for Wireless Devices, University Paderborn*. Priyantha NB (2005): *The Cricket Indoor Location System, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 26. http://wwwcs.upb.de/cs/ag-kao/de/teaching/ws04/pg_lbs/Seminarausarbeitungen/Müller.pdf%5Cnhttp://www2.cs.uni-paderborn.de/cs/ag-kao/de/teaching/ws04/pg_lbs/Seminarausarbeitungen/Müller.pdf.
- Novrianto, Reky. 2012. "Methoden Zur Lokalisierung von Drahtlosen Endgeräten Vorgelegt."
- Openstreetmap. n.d. <https://www.openstreetmap.de/karte.html>
- Prof. Dr. Uwe Großmann, Prof Dr. Christof Röhring. n.d. "Lokalisierung von Mobilien Endgeräten von WLAN-RSS-Methode."
- Retscher, Günther, and Michael Kistenich. 2006. "Vergleich von Systemen Zur Positionsbestimmung Und Navigation in Gebäuden." *ZFV - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation Und Landmanagement* 131 (1): 25–35. doi:AC06586665.
- Schmidt, Michael. 2010. "Positionsbestimmung in Gebäuden," no. Ubisense 7000. <http://cst.mi.fu-berlin.de/teaching/WS0910/19510b-PS-TI/schmidt10positionsbestimmung.pdf>.
- Scholz Heike. 2014. "[Interview] Tracking Am POS Zulässig?" <https://www.mobile-zeitgeist.com/interview-tracking-pos/>.
- Schwabinger Weihnachtsmarkt auf der Münchner Freiheit. 2017. Accessed January 17. <http://www.schwabingerweihnachtsmarkt.de/der-markt/kuenstlerinnen/>

Anhang

Auf der beigefügten CD befindet sich folgender Inhalt:

- Der schriftliche Teil der Arbeit als Worddokument
- Die Daten der Aufnahmen
- Die Skripte in Python zur Verarbeitung
- Die Genehmigungen zur Verwendung der Bilder

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 17. April 2017

Vorname Nachname

Michael Rostek

Pläntschweg 9a

D-81247 München

michi.rostek@gmail.com