



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## DIPLOMARBEIT

# Indoor Positionierung mit differenziellem WLAN

Ausgeführt am Department für  
Geodäsie und Geoinformation  
Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie  
der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

**Ao. Univ. Prof. Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günther RETSCHER**

durch

**Thomas TATSCHL**

**Arling 10**

**9411 St. Michael**

**Matrikelnummer: 1031418**

Dezember 2015



# Kurzfassung

Der momentane Ort des Smartphone-Users ist für zahlreiche Anwendungen essenziell. In der Indoor-Positionierung ist sehr viel Forschungspotential vorhanden, da Global Navigation Satellite Systems (GNSS) eine unzureichende Verfügbarkeit bieten. Im Rahmen dieser Arbeit wird, unter Verwendung von Wireless Local Area Network (WLAN), die Position des Users auf Basis der Trilateration bestimmt. Dazu werden vier Methoden zur Konvertierung der gescannten Signalstärken vorgestellt, um einen Längenzusammenhang herzustellen. In der ersten Variante, dem One-Slope-Modell, wird mit einer logarithmischen Funktion dieser Zusammenhang geschaffen, zusätzlich werden im Multi-Wall-Modell Dämpfungseffekte der Wände berücksichtigt. In den beiden differenziellen Methoden wird versucht, durch die Verwendung von Referenzstationen, die zeitliche Variation und diverse Ausbreitungseffekte der WLAN-Signale zu minimieren. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes werden Korrekturen von den Referenzstationsdaten abgeleitet und am User angebracht. Im Gegensatz dazu wird in der 2. Methode eine Differenzenbildung der empfangenen Signalstärken durchgeführt und in Distanzdifferenzen umgewandelt.

In den praktischen Anwendungen wurden, mit drei unterschiedlichen Smartphones, kinematische und statische Scans im Foyer und Hörsaal VII des Elektrotechnischen Institutsgebäude der TU Wien durchgeführt. Als Referenzstationen wurden drei Raspberry Pi's eingesetzt, welche das WLAN-Signal permanent scannen.

In der statischen Positionierung zeigte sich in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes, bei guten räumlichen Bedingungen, eine Reduktion der mittleren Positionsabweichung von 9 m auf 5 m. In der kinematischen Anwendung zeigten sich bereits ohne Referenzstationsdaten gute Ergebnisse und die mittleren Positionsabweichungen liegen bei 7 m. In der kinematischen, wie auch in der statischen Positionierung, konnten große räumliche Unterschiede festgestellt werden, wobei die Dämpfung der WLAN-Signale durch physikalische Objekte einen signifikanten Einfluss auf die Positionierung ausüben.

Die Analysen ergaben in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes einen deutlichen Zusammenhang zwischen Positionierungsfehler und dem Abstand des Users zur Referenzstation. In weiterer Folge wurde im Vergleich der verwendeten Smartphones festgestellt, dass das *HTC Desire X* im Vorteil gegenüber den beiden *Samsung* Geräten in der Positionierung des Smartphone-Users ist. Als Resümee kann festgehalten werden, dass in großen, freien Räumen das One-Slope-Modell ohne Referenzstationen durchaus gute Ergebnisse in der statischen, wie auch in der kinematischen Positionierung liefert. Bei auftretender Dämpfung der Signale durch physikalische Objekte, zeigte die Verwendung von Referenzstationsdaten in der Positionierung durchaus Verbesserungen.





# Abstract

The current location of the smartphone user is essential for a number of applications. In indoor positioning high research potential exists as Global Navigation Satellite Systems (GNSS) cannot provide a sufficient availability. In this work, the position of the user is determined based on the trilateration using Wireless Local Area Network (WLAN). These four methods are presented for converting the scanned signal strengths to get a distance conversion. In the first version, the one-slope model, the distance conversion is established by a logarithmic function. Additionally to this the damping effects of the walls are taken into account in the multi-wall model. In the two differential methods an attempt is to minimize the time variation and propagation effects of WLAN-signals by the use of reference stations. In the first method of the differential approach corrections are derived from the reference station data and attached to the user. In contrast, in the second method, difference formations of the received signal strengths are performed and they are converted into distance difference.

In the practical applications, kinematic and static scan, with three different smartphones, were conducted in the foyer and auditorium VII of the Electrotechnical Institut-Building at the TU Vienna. Three Raspberry Pi's were used as reference stations for continuous scanning the WLAN-signal.

In the static position, in the first method of the differential approach was shown a reduction in the mean position deviation of 9 m to 5 m in the case of good spatial conditions. In the kinematic application good results were achieved without reference station data and the middle position deviations are at 7 m. In the kinematic as well as in the static position, large spatial differences were observed, the attenuation of the WLAN-signals, exercised by physical objects, has a significant influence on the positioning.

The analyzes were able to establish in the first method of the differential approach a clear connection between positioning error and the distance of the user from a reference station. Furthermore the result of the comparison of used smartphones is, that the *HTC Desire X* takes an advantage over the two *Samsung* devices in the positioning of the smartphone user. To sum up it can be stated, that the one-slope-model gives good results in large free rooms without reference stations in the static as well as in the kinematic positioning. In the absorption of the signals by physical objects, the use of reference station data in the positioning showed quite improvements.



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ziele und Rahmenbedingungen . . . . .              | 2         |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b>                     | <b>3</b>  |
| 2.1      | Grundlagen der Positionsbestimmung . . . . .       | 3         |
| 2.1.1    | Differente WLAN-Positionierungsverfahren . . . . . | 5         |
| 2.1.2    | Trilateration . . . . .                            | 5         |
| 2.1.3    | Differenzielle Trilateration . . . . .             | 9         |
| 2.2      | Wireless Local Area Network . . . . .              | 12        |
| 2.2.1    | Frequenzbereiche und Kanäle . . . . .              | 13        |
| 2.2.2    | Wellenausbreitung . . . . .                        | 14        |
| 2.2.2.1  | Sendeleistung . . . . .                            | 14        |
| 2.2.2.2  | Antennengewinn . . . . .                           | 15        |
| 2.2.2.3  | Freiraumdämpfung . . . . .                         | 17        |
| 2.2.2.4  | Externe Störeinflüsse . . . . .                    | 18        |
| 2.2.2.5  | Physikalische Rahmenbedingungen . . . . .          | 18        |
| 2.2.3    | Ausbreitungsmodelle . . . . .                      | 20        |
| 2.2.3.1  | One-Slope-Modell . . . . .                         | 20        |
| 2.2.3.2  | Multi-Wall-Modell . . . . .                        | 21        |
| 2.2.3.3  | Ray Launching und Ray Tracing . . . . .            | 22        |
| <b>3</b> | <b>Systemkomponenten</b>                           | <b>25</b> |
| 3.1      | Access Point . . . . .                             | 25        |
| 3.2      | Referenzstation . . . . .                          | 26        |
| 3.3      | Benutzer . . . . .                                 | 27        |
| <b>4</b> | <b>Vorbereitende Analysen und das Messgebiet</b>   | <b>29</b> |
| 4.1      | Messgebiet . . . . .                               | 29        |
| 4.2      | Raspberry Zeitreihen . . . . .                     | 32        |
| 4.3      | Zusammenhang Raspberry und Smartphone . . . . .    | 35        |
| 4.4      | Userorientierung . . . . .                         | 37        |
| 4.5      | Längenzusammenhang . . . . .                       | 39        |
| 4.5.1    | One-Slope-Modell . . . . .                         | 40        |
| 4.5.2    | Multi-Wall-Modell . . . . .                        | 41        |
| 4.5.3    | Differenzieller Ansatz, 1. Methode . . . . .       | 44        |

|          |                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.4    | Differenzieller Ansatz, 2. Methode . . . . .              | 45         |
| 4.5.5    | Vergleich der einzelnen Modelle . . . . .                 | 47         |
| <b>5</b> | <b>Positionierung</b>                                     | <b>49</b>  |
| 5.1      | Statische Positionsbestimmung . . . . .                   | 49         |
| 5.1.1    | Signalstärkeninvertierung . . . . .                       | 50         |
| 5.1.2    | Positionsberechnung . . . . .                             | 54         |
| 5.2      | Kinematische Positionsbestimmung . . . . .                | 61         |
| 5.2.1    | Signalstärkeninvertierung . . . . .                       | 61         |
| 5.2.2    | Positionsberechnung . . . . .                             | 66         |
| <b>6</b> | <b>Analysen</b>                                           | <b>71</b>  |
| 6.1      | Vergleich der Ausgleichungsart . . . . .                  | 71         |
| 6.1.1    | Statische Positionierung . . . . .                        | 71         |
| 6.1.2    | Kinematische Positionierung . . . . .                     | 74         |
| 6.2      | Standort der Referenzstationen . . . . .                  | 76         |
| 6.3      | Vergleich der unterschiedlichen Smartphones . . . . .     | 83         |
| 6.3.1    | Statische Positionierung . . . . .                        | 84         |
| 6.3.2    | Kinematische Positionierung . . . . .                     | 89         |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                    | <b>96</b>  |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                              | <b>99</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                               | <b>101</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>                                             | <b>103</b> |
| A.1      | Graphiken Raspberry Zeitreihen . . . . .                  | 103        |
| A.2      | Graphiken Zusammenhang Raspberry und Smartphone . . . . . | 105        |
| A.3      | Graphiken Längenzusammenhang . . . . .                    | 106        |
| A.4      | Graphiken Smartphone Samsung Ace . . . . .                | 112        |
| A.4.1    | Statische Positionsbestimmung . . . . .                   | 112        |
| A.4.2    | Kinematische Positionsbestimmung . . . . .                | 115        |
| A.5      | Graphiken Smartphone Samsung Galaxy . . . . .             | 118        |
| A.5.1    | Statische Positionsbestimmung . . . . .                   | 118        |
| A.5.2    | Kinematische Positionsbestimmung . . . . .                | 121        |

# 1 Einleitung

Die rasante Entwicklung der Smartphones, vor allem in der letzten Dekade, hat speziell das Internet zu einem weltweit wichtigen Medium in unserer Gesellschaft werden lassen. Kabellose Internetzugänge sind mittlerweile in vielen öffentlichen Gebäuden zu finden. Für zahlreiche Anwendungen am Smartphone, wie beispielsweise Location Based Services (LBS) oder Navigationsaufgaben, ist der momentane Ort des Benutzers essentiell. In freier Umgebung stellt die satellitengestützte Positionierung am Smartphone keine Schwierigkeiten dar. Generell verbringen wir aber 90% all unserer Zeit in Gebäuden und Personen verlieren in großen Gebäuden leichter die Orientierung, da die Sichtverhältnisse gegenüber im Freien sehr stark eingeschränkt sind. Des Weiteren gibt es in Gebäuden immer mehrere Ebenen, welche der Benutzer mittels Treppen und Aufzügen überwinden kann, aber die Navigation nicht gerade vereinfacht. Gerade im Indoor-Bereich stellt die Positionierung des Smartphonebenutzers einen komplexen und vielseitigen Task dar, da Global Navigation Satellite System (GNSS) unzureichende Verfügbarkeit oder nur begrenzte Genauigkeit und Kontinuität bietet. Die Indoor-Positionierung geschieht in der sogenannten GNSS-Navigationslücke, siehe Abbildung 1.1. In solchen Umgebungen verweigern herkömmliche GNSS-Empfänger, wie sie in Smartphones zum Einsatz kommen, die Positionsbestimmung.

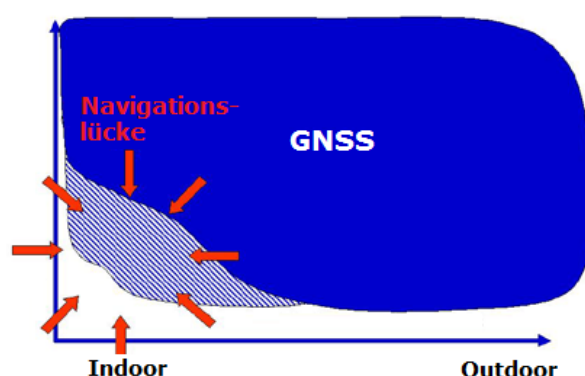


Abbildung 1.1: GNSS-Navigationslücke, nach Prof. John Raquet, AFIT, USA

Aus diesem Grund sollen vorhandene *Wide Local Area Network (WLAN)* Signale zur Positionsbestimmung des Users, auf Basis der Trilateration, genutzt werden. Hier wird durch Abstände zu bekannten Punkten, welche zuvor aus empfangenen Signalstärken (engl. *Received Signal Strength Indicator* kurz *RSSI*) abgeleitet wurden, die Position als Schnittpunkt von Kugeln bzw. Kreisen bestimmt. Diese Methode soll erstmalig durch einen differenziellen Ansatz erweitert werden, wo mittels Referenzstationen Korrekturwerte für den Nutzer bereitgestellt werden. Ein großer Hauptvorteil zu anderen Positionierungstechnologien wie *Radio Frequency Identification (RFID)* oder *Bluetooth* ist, dass in öffentlichen Gebäuden die benötigte Infrastruktur des WLAN-Netzwerkes bereits vorhanden ist, was eine wesentliche Zeit- und Kostenersparnis in der Anschaffung bzw. Installation bedeutet. Im Gegensatz zu Fingerprinting ist bei der Trilateration keine lange Trainingsphase, bei der eine Datenbank befüllt wird, nötig. Eine bedeutende Herausforderung ist die Modellierung der Effekte von Absorption, Reflexion und Streuung der WLAN-Signale. Die zeitliche Variation des RSSI soll durch den permanenten Scan von Referenzstationen berücksichtigt werden. Ebenfalls hat die Anwesenheit diverser Personen, insbesondere die Nähe des Benutzers, einen signifikanten Einfluss auf die empfangene Signalstärke.

## 1.1 Ziele und Rahmenbedingungen

Aktuelle kommerzielle Indoor Positionierungssysteme (Navizon, WiFiSLAM, etc.) bieten eine erreichbare Positionsgenauigkeit von rund 3 m. Ziel der Arbeit ist es, mit geringem finanziellen Aufwand eine vergleichbare Genauigkeit zu erzielen, aber vor allem eine kontinuierliche und zuverlässige Positionierung im Indoorbereich zu schaffen.

Zunächst gibt das zweite Kapitel eine Einführung in die mathematischen Kenntnisse der Positionierung mittels Trilateration bzw. des differenziellen Ansatzes. Des Weiteren werden technische Grundlagen von WLAN-Systemen und das Ausbreitungsverhalten elektromagnetischer Wellen vermittelt. Im dritten Kapitel werden die einzelnen Systemkomponenten des Indoor-Positionierungssystems vorgestellt. Das vierte Kapitel gibt einen Überblick über die praktischen Messungen, die im Zuge dieses Projektes im TU-Gebäude durchgeführt wurden. Ebenso werden hier essentielle Voruntersuchungen analysiert. Das Hauptaugenmerk der Arbeit bildet das fünfte Kapitel, indem anhand der gesammelten Daten verschiedene Positionierungsprozesse angewendet werden. Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der Positionierung analysiert und mit den verschiedenen Methoden, wie auch den unterschiedlichsten Smartphones, verglichen. Das siebte Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammen und gibt Empfehlungen auf Grundlage der analysierten Testdaten.

## 2 Theoretische Grundlagen

Kapitel 2 ist in zwei größere Unterkapitel eingeteilt. Der erste Teil gibt einen Einblick über die Positionierung mittels WLAN. Darüber hinaus wird der differenzielle Ansatz der Trilateration näher erläutert. Zum besseren Verständnis werden im nachfolgenden Teil die technischen Grundlagen des Wireless Local Area Network (WLAN), sowie die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen näher dargestellt.

### 2.1 Grundlagen der Positionsbestimmung

Grundsätzlich kann zwischen relativer Positionierung (*Dead Reckoning*) und absoluter Positionierung (*Position Fixing*) unterschieden werden. Bei Dead Reckoning oder auch Koppelnavigation genannt, wird die aktuelle Position, mit Hilfe von relativen Messungen, zur letzten Position ermittelt. Im Gegensatz dazu geschieht die absolute Positionierung mittels Messungen zu äußeren Punkten, ohne Bezugnahme auf die vorangegangene Position. Hier können verschiedene Positionierungstechniken angewendet werden:

- Zellbasierte Verfahren, siehe Kapitel 2.1.1.
- Fingerprinting, siehe Kapitel 2.1.1.
- Trilateration, in Kapitel 2.1.2 ausführlich beschrieben.
- Angle of Arrival (AoA); Basierend auf Winkelmessung. Die Position wird aus dem Schnittpunkt zweier Richtungsstrahlen gebildet.
- Time of Arrival (ToA); Durch Laufzeitmessungen wird die Distanz zwischen Sender und Empfänger abgeleitet, sodass die Position ähnlich wie im Trilaterationsverfahren bestimmt wird.
- Time Difference of Arrival (TDoA); Bildung von Zeitdifferenzen, sodass sich die Position aus einem hyperbolischen Schnittpunkt ergibt. Hierbei werden empfängerabhängige Uhrenfehler berücksichtigt.

Mit Hilfe von WLAN-Signalen kann die Positionierung neben der Methode der Trilateration auch mit dem zellbasierten Verfahren, sowie dem Fingerprinting geschehen, siehe Kapitel 2.1.1. Für die Methode Angel of Arrival, sind WLAN-Antennen im Allgemeinen nicht konstruiert. Zeitbasierende Verfahren (ToA, TDoA) können mittels WLAN nicht realisiert werden, da Access Points nicht die geforderte zeitliche Präzision aufweisen, Vossiek und Wiebking (2003).

In den letzten Jahren sind Sensoren immer kleiner und günstiger geworden, sodass sie in moderne Smartphones integriert werden. Die im folgenden genannten unterschiedlichsten Technologien sind in zahlreichen Publikationen untersucht worden. Hier ist ein großes Zukunftspotential vorhanden, um die Indoor-Positionierung weiter voranzutreiben.

*Bluetooth* ist ähnlich wie *Infrarot* ein funkbasierter Datenaustausch für den Nahbereich. Die neueste Version *Bluetooth 4.0* ermöglicht in einer kürzeren Zeitdauer den Verbindungsaufbau und der Datenaustausch ist über eine längere räumliche Distanz möglich (bis ca. 100m), Bai et al. (2014).

Bei *Radio Frequency Identification (RFID)* kommuniziert ein Lesegerät mit einem oder mehreren Transpondern (Tags), mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen. Der Transponder wird am identifizierenden Objekt angebracht und kann so vom Lesegerät erkannt werden. Hierbei ist der Einsatz von mehreren RFID-Transpondern möglich, Retscher et al. (2012).

Preiswerte *Inertial Measurement Unit (IMU)*, wie sie in Smartphones integriert sind, weisen kurzfristig gute Ergebnisse auf, jedoch kommt es ohne absolute Updates zu starken Drifts der Sensoren, was sich bei fortschreitender Positionierung fatal auf die Genauigkeit auswirkt, Hofman-Wellenhof et al. (2011).

Die *Bildgestützte Positionierung* ist eine Nachahmung des menschlichen Sehsinns, die eine Eigen- und Fremddortung ermöglicht, wobei die Eigenortung in fremder Umgebung eine sehr komplexe Aufgabenstellung darstellt. Integrierte Ansätze zeigen vielversprechende Resultate, wobei hier ein großes Potential vorhanden ist, vor allem auch auf dem Gebiet *Augmented Reality*, wo Informationen mit der Realität verschmelzen.

WLAN besitzt zu den genannten Technologien einen wesentlichen Vorteil, da in vielen öffentlichen Gebäuden bereits auf vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden kann. Es ist als User auch nicht nötig sich in das Netzwerk einzuloggen, es genügt lediglich einen Signalstärkenscan der WLAN-Signale durchzuführen.



### 2.1.1 Differente WLAN-Positionierungsverfahren

#### Zellbasierte Verfahren

Bei diesem einfachen Verfahren wird festgestellt, in welcher Zelle sich der User befindet. Generell wird dieses Verfahren als Cell of Origin (CoO) bezeichnet und funktioniert bei jedem funkbasierten Netzwerk (GSM, WLAN, etc.). Die Positionierungsgenauigkeit dieser Methode ist abhängig von der Zellgröße, liegt aber im Allgemeinen bei WLAN-CoO zwischen 25 m im Innen- und 200 m im Außenbereich.

Weitere Nebeneffekte, die die Genauigkeit negativ beeinflussen, sind einerseits die Zellatmung, bei welcher sich die Größe der Zellen durch die Anzahl der Clients ändert und andererseits die Handover-Strategie der WLAN-Adapter, bei welcher sich aufgrund relativer Signalstärkenänderungen, auch die Zellgröße dynamisch ändert, siehe Dornbusch und Zündt (2002).

#### Fingerprinting

Im Gegensatz zur Trilateration wird im Fingerprinting der Effekt der Dämpfung und Reflexion ausgenutzt, um die Position des Users zu bestimmen. Dazu wird die empfangene Signalstärke mit einem Referenzdatensatz in einer Datenbank verglichen. Diese Datenbank wird in der sogenannten Offline-Phase befüllt. Hierbei werden an bekannten ausgewählten Positionen die Signalstärken aller Access Points gesammelt. Die eigentliche Positionierung des Users geschieht in der Online-Phase, wo der wahrscheinlichste Datensatz in der Datenbank den Userstandort widerspiegelt.

Die Genauigkeit dieser Positionierungsmethode ist im Wesentlichen von der Rasterweite der Referenzdaten abhängig und liegt bei vernünftig gewählten Referenzpunkten bei ca. 10 m. Ein zentraler Vorteil bei Fingerprinting gegenüber der Trilateration ist, dass Multipath- und Dämpfungseffekte der Signale genutzt werden und die Positionierung auch bei Empfang von nur einem einzigen Access Point funktioniert. Der wesentliche Nachteil liegt am Zeitaufwand der Befüllung der Datenbank bzw. kann es zu Problemen kommen, wenn sich die Umgebung, welche das Signal signifikant beeinflusst, ändert. Dies kann schon durch das Öffnen von Türen oder Fenstern, bzw. der Ausrichtung des Handybenutzers passieren, siehe Dornbusch und Zündt (2002).

### 2.1.2 Trilateration

Ziel der Trilateration ist es, die Position des Smartphonebenutzers, mittels Abständen zu bekannten Punkten, zu bestimmen. Diese Entfernungen werden zuvor mit einem Zusammenhang zu den empfangenen Signalstärken (engl. *Received Signal Strength*, *RSS*

abgeleitet.

Die Lage (3d-Koordinate) der einzelnen Sender (Access Points) ist zuvor in einem definierten Koordinatensystem zu bestimmen. Die Line of Position (LoP) einer Beobachtung ist im 2-dimensionalen Fall ein Kreis um den jeweiligen Access Point, siehe Abbildung 2.1, bzw. im 3-dimensionalen Fall erweitert sich die Surface of Position (SoP) zu einer Kugel.

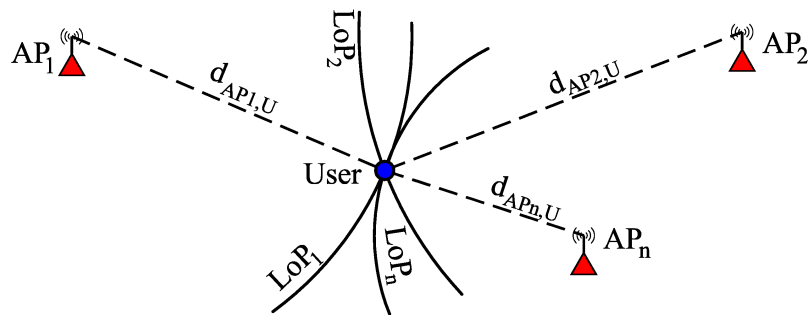


Abbildung 2.1: Konzept der Trilateration

Zur eindeutigen mathematischen Lösung dieser Schnittaufgabe, sind im zweidimensionalen Fall drei und im 3-d. Fall, vier Beobachtungen erforderlich. Wenn eine Beobachtung in beiden Fällen weniger auftritt (zwei im 2-d. und drei Beobachtungen im 3-d. Fall), treten jeweils zwei Schnittpunkte auf (Casus Ambiguus), von denen beide die mögliche Position des Users darstellt.

Im Grunde genommen genügt es im Indoorbereich eine zweidimensionale Positionsbestimmung durchzuführen, da die Höhe des Users zumeist eine untergeordnete Rolle spielt, da nur jenes Stockwerk des Gebäudes von Bedeutung ist, in welchem sich der User befindet. Die Ebenenbestimmung des Users kann durch eine kausale Abfrage geklärt werden, beispielsweise in welchem Stockwerk sich die meisten empfangenen AP des aktuellen Scans befinden. Natürlich kann diese Ebenenbestimmung des Handybenutzers Probleme bereiten, wenn sich in einem Stockwerk wenige oder gar keine AP befinden oder sich der Benutzer gerade im Stiegenhaus oder im Liftschacht befindet.

### Methode der kleinsten Quadrate

Bei der User-Standortberechnung ergeben mehr als zwei Signalstärkenbeobachtungen eine Überbestimmung, bei der sich die LoP auch nur in Ausnahmefällen in einem gemeinsamen Schnittpunkt schneiden. Die Position des Smartphonebenutzers wird somit in einem Ausgleichsverfahren, das auf die Minimierung der  $L_2$ -Norm beruht oder auch bekannt ist als Methode der kleinsten Quadrate, bestmöglichst geschätzt, vgl. Niemeier (2008). Abbildung 2.2 zeigt ein praktisches Beispiel der Positionsschätzung mit drei Beobachtungen. Die Userposition (blauer Punkt) liegt somit an der Stelle, wo sich die Verbesserungsqua-

drate minimieren, siehe Formel 1.

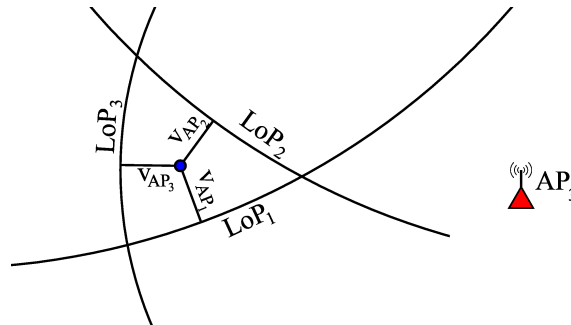


Abbildung 2.2: Beispiel einer kleinsten Quadrate Schätzung der User Position

$$v^T v \rightarrow \min \quad (1)$$

Im zweidimensionalen Fall kann folgende Beobachtungsgleichungen (Kreisgleichung) aufstellen werden,

$$d_{U,AP_i}^2 = (X_U - X_{AP_i})^2 + (Y_U - Y_{AP_i})^2 \quad (2)$$

mit:  $d_{U,AP_i}$  ... Distanz zwischen AP und Smartphone-User,  
 $X_U, Y_U$  ... Koordinaten des Smartphone-Users,  
 $X_{AP}, Y_{AP}$  ... Koordinaten der Access Points.

Als Ausgangspunkt gilt das Gauss-Markov-Modell, mit dem funktionalen Modell:

$$l + v = A * x \quad (3)$$

mit:  $l$  ... Vektor der Beobachtungen (Distanzen zu AP),  
 $v$  ... Vektor der Verbesserungen,  
 $x$  ... Vektor der unbekannten Parameter (User Position) ,  
 $A$  ... Designmatrix mit den partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichung nach den gesuchten Parametern:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{X_{AP_1} - X_U}{d_{U,AP_1}} & -\frac{Y_{AP_1} - Y_U}{d_{U,AP_1}} \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{X_{AP_n} - X_U}{d_{U,AP_n}} & -\frac{Y_{AP_n} - Y_U}{d_{U,AP_n}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Als Lösung der Extremwertaufgabe (Formel 1), erhält man die Schätzung des unbekannten Parametervektors, Niemeier (2008):

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T l. \quad (5)$$

Da das Gleichungssystem der Beobachtungen in Formel 2 nicht linear ist, sind Näherungswerte für die gesuchten Parameter (Userposition) einzuführen. Hierbei werden die Koordinaten des nächstgelegenen Access Points als Näherungswerte der Userposition angenommen. Da sich diese Näherungswerte in manchen Fällen weit entfernt vom User befinden, ist die Linearisierung unzulässig und die Hauptprobe:

$$d_i + v_i \stackrel{!}{=} f_i(X_1^0 + \hat{x}_1, X_2^0 + \hat{x}_2) \quad (6)$$

mit:  $X_i^0$  ... Näherungswerte,  
 $\hat{x}_i$  ... geschätzte Parameter,

geht nicht auf. Darum wird bei jeder Positionsbestimmung eine iterative Ausgleichung durchgeführt. In jeder Wiederholung werden die Näherungskordinaten mit den zuvor geschätzten Parametern verbessert. Die Iteration wird solange durchgeführt, bis die Norm des geschätzten Parametervektor einen Grenzwert von 1 cm unterschreitet. Da sich in den Beobachtungsdaten einzelne markante Abweichungen zeigen und die kleinste Quadrateschätzung eine Normalverteilung der Beobachtungsdaten voraussetzt, wird eine Adaption der dänischen Methode zur Gewichtung der Beobachtungen eingesetzt, siehe Schuh (1984). Dabei wird in einem iterativen Prozess die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen als Funktion der Verbesserungen des letzten Ausgleichs ermittelt,

$$p_i = \exp^{-\left|\frac{v_i}{\sigma}\right|^{4,4}}^{0,05} \quad \text{für die 2. und 3. Iterationen} \quad (7)$$

$$p_i = \exp^{-\left|\frac{v_i}{\sigma}\right|^{3,0}}^{0,05} \quad \text{für folgende Iterationen} \quad (8)$$

mit:  $\sigma$  ... Gewichtseinheitsvarianz.

Die Iteration wird solange wiederholt, bis sich die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen nicht mehr ändert.

### Robuste Schätzung LMS

Least-Median-Square-Schätzung (LMS) ist ein robustes Schätzverfahren, das im Gegensatz zum kleinsten Quadrate Schätzer keine Normalverteilung der Beobachtung voraussetzt. Die Bruchstelle liegt bei fast 50%, was bedeutet, dass fast die Hälfte der Beobachtungen falsch sein könnte, um noch akzeptable Ergebnisse zu erhalten. Die Forderung von

LMS, liegt bei der Minimierung des Medians der quadrierten Verbesserungen, Niemeier (2008):

$$\text{med}(v^2) \rightarrow \min \quad (9)$$

Durch Kombinationen von Beobachtungen wird die Userposition wiederholt berechnet. Im zweidimensionalen Fall der Trilateration bedeutet dies, dass zwei Distanzbeobachtungen zwei mögliche Positionen (casus ambiguus) des Benutzers darstellen. Danach können zu jeder Lösung die Verbesserungsquadrate zu allen Beobachtungen gebildet werden. Die Lösung mittels LMS ist die Kombination von dem kleinsten Wert des Medians der quadrierten Verbesserungen.

Ein massiver Nachteil von LMS ist die mögliche hohe Anzahl von Kombinationen, die bei jeder einzelnen Positionsbestimmung gelöst werden muss,

$$\text{Anzahl an Kombinationen} = \binom{n}{2} * 2 \quad (10)$$

In einem Fall von sechs Signalstärkenbeobachtungen an einem Standpunkt ( $n = 6$ ) müssen 30 Kombinationen bestimmt werden.

### 2.1.3 Differenzielle Trilateration

Die differenzielle Trilateration nützt permanente Scans von Referenzstationen, (RS in Abbildung 2.3) um räumliche und zeitliche Variationen der empfangenen Signalstärken des Users zu eliminieren. Hierbei können auch mehrere Referenzstation zum Einsatz kommen, welche sich jeweils an koordinativ bekannten Punkten befinden. Das wesentliche Ziel ist es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Userposition zu verbessern. Im folgenden werden zwei verschiedene Methoden der differenziellen Positionierung vorgestellt.

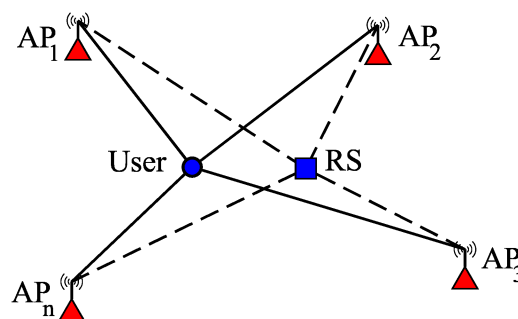


Abbildung 2.3: Konzept des differenziellen Trilateration

### Differenzielle Trilateration, 1. Methode

Das Prinzip dieser Methode ist ähnlich wie bei *differenziellen GPS (DGPS)*. Die aktuellen Scans der Referenzstation werden mit den nominellen Signalstärken verglichen, welche mittels der Position der Referenzstation berechnet werden, um daraus Korrekturen abzuleiten. Der User verwendet diese Korrekturen um seine Scans zu verbessern und senderabhängige Fehler und auch diverse Ausbreitungsfehler zu eliminieren.

Durch die bekannte Position der Referenzstation und den Zusammenhang zwischen Länge und Signalstärke lässt sich die theoretische Signalstärke, an der Referenzstation  $RSS_{calc}$  ableiten. Durch einfache Differenzenbildung zu den gemessenen Werten  $RSS_{obs}$  können Korrekturen berechnet werden, die hier als Signalstärkenkorrekturen  $RSS_{corr}$  bezeichnet werden:

$$RSS_{corr}(t) = RSS_{calc} - RSS_{obs}(t) \quad (11)$$

Diese Korrekturen werden zu den empfangenen Signalstärken des Users addiert, um diese zu verbessern. Eine wichtige Tatsache spielt dabei die Synchronität zwischen Referenzstation und Smartphone, da der Korrekturwert eine zeitliche Variation beinhaltet. Des Weiteren ist es offensichtlich, dass die berechneten Korrekturen nur in der näheren Umgebung zur Referenzstation ihre Genauigkeit erfüllen, da Dämpfungseffekte von den örtlichen Gegebenheiten abhängig sind.

### Flächenkorrekturen

Durch die Verwendung mehrerer Referenzstationen wird eine räumliche Interpolation der Korrekturen möglich. Hierbei wird eine zweidimensionale lineare Ebeneninterpolation angewendet, um Korrekturwerte direkt an der Position des Users zu erzeugen. Die allgemeine Ebenengleichung, Niemeier (2008):

$$z(x, y) = a_0 + a_1 * x + a_2 * y \quad (12)$$

kann mit den drei Korrekturwerten jeder Referenzstation aufgestellt werden. Die Matrizen-schreibweise zeigt:

$$\begin{bmatrix} RSS_{corr1} \\ RSS_{corr2} \\ RSS_{corr3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Die Flächenparametern in  $a$  ergeben sich eindeutig, mit

$$a = A^{-1} * z. \quad (14)$$

Mit diesen drei Parametern in  $a$  ist die Ebene exakt definiert. Der Korrekturwert am

Userstandort kann direkt mit den Flächenparametern in Formel 12 bestimmt werden. Die Korrekturwerte können innerhalb des Dreiecks interpoliert, wie auch außerhalb der drei Referenzstationen, extrapoliert werden. Wie in Formel 12 ersichtlich, müssen jedoch die Standpunktskoordinaten des Users vor der Interpolation bekannt sein. Dies geschieht in einem iterativen Prozess, bei welchem die Userposition vorab ohne Korrekturen bestimmt wird.

### Differenzielle Trilateration, 2. Methode

Das Prinzip der 2. Methode ist ähnlich wie bei *Very Long Baseline Interferometry (VLBI)*. Die Differenzenbildung geschieht jedoch nicht auf Basis von Laufzeiten, sondern auf den empfangenen Signalstärken vom User und der Referenzstation:

$$\Delta RSS = RSS_{User} - RSS_{RP} \quad (15)$$

In Kapitel 4.5 wird zu dieser Signalstärkendifferenz  $\Delta RSS$  empirisch ein Zusammenhang zur kongruenten Längendifferenz ( $d_{U,AP} - d_{RP,AP}$ ) gebildet.

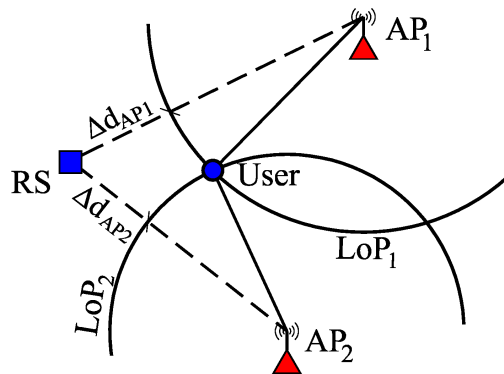


Abbildung 2.4: Konzept der 2. Methode der differenziellen Trilateration

In Abbildung 2.4 kann man erkennen, dass die Positionsbestimmung des Users grundsätzlich auf der selben Trilaterationsmethode beruht. Jedoch wird der Abstand zwischen User und Access Point, über die bekannte Distanz zwischen Referenzstation und Access Point und mit der Längendifferenz ( $d_{U,AP} - d_{RP,AP}$ ) bestimmt, welche zuvor aus den Signalstärkendifferenzen abgeleitet wird.

$$d_{U,AP_i} = d_{RP,AP_i} - \Delta d_{AP_i} \quad (16)$$

Auf das Vorzeichen der Längendifferenz in Formel 16, sollte beachtet werden, da die vorzeichenbehaftete Signalstärkendifferenz einen inversen Zusammenhang mit der Längendifferenz aufweist.

Im Prinzip kann bei dieser Methode der differentiellen Trilateration die Länge zwischen Access Point und User mit einer empfangenen Signalstärke des Users, mit beliebig vielen Referenzstationen, subtrahiert werden, was weitere Beobachtungsgrößen für die Positionsbestimmung liefert.

## 2.2 Wireless Local Area Network

WLAN bedeutet eine drahtlose Übertragung von Daten mittels Funkwellen in einem räumlich begrenzten Netzwerk. Da WLAN im freien Frequenzraum arbeitet, darf jede Person Geräte aufstellen und diese auch betreiben. Dies hat das Internet in den letzten Jahren einen wichtigen Teil unserer mobilen Gesellschaft werden lassen, was zu einer starken Verbreiterung von Hot Spots (öffentliche Internetzugangspunkte) bzw. zugänglichen WLAN in Cafe's, Bars, Einkaufszentren, etc. führte. Diese Gegebenheit bringt aber auch eine Vermehrung von Störungen und Fehleranfälligkeiten mit sich. Der zugrundeliegende Standard 802.11 wurde vom *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* entwickelt. Für Wn stehen zwei Frequenzblöcke, bei 2,4 GHz und 5,0 GHz, zur Verfügung. Die Aufteilung der einzelnen Kanäle, sowie die angewendeten Modulationsverfahren werden in den einzelnen Standards genau festgelegt, um diese Frequenzbereiche optimal auszunützen (maximale Bandbreite), Metter und Bucher (2007).

Grundsätzlich werden bei einem WLAN zwei Betriebsarten unterschieden. Im *Ad-Hoc* Modus sind alle Teile des Netzwerkes gleichwertig und die Kommunikation geschieht direkt zwischen zwei oder mehreren Clients. Der *Infrastruktur* Modus hingegen, ist ähnlich eines Mobilfunknetzes. Hierbei werden von einer Basisstation (Access Point oder drahtlosen Router) Daten an alle Clients gesendet. Ein Netzwerk mit nur einem Access Point wird als Basic Service Set (BSS) bezeichnet. Die räumliche Abdeckung eines Access Points wird als Funkzelle beschrieben. Die Größe dieser Funkzelle ist einerseits durch die räumlichen Gegebenheiten, andererseits durch die Sendeleistung bzw. der verwendeten Antennen am Access Point definiert. Der Access Point reagiert auf die steigende Zahl der Clients durch eine Regelung der Sendeleistung, um alle Clients gleichermaßen zu versorgen. Je mehr Clients sich in einer Zelle befinden, umso geringer ist die Signalstärke und Funkzelle schrumpft. Dieser Effekt tritt auch entgegengesetzt auf, wenn die Zahl der Clients abnimmt. Im Infrastruktur Modus ist es auch möglich, dass das Netzwerk mit mehreren Access Points erweitert wird, um so eine größere räumliche Abdeckung zu schaffen. Dies wird als Extended Service Set (ESS) bezeichnet. Der Zellwechsel eines Clients in ESS wird



als Roaming beschrieben. Hier ist eine gute Netzabdeckung erforderlich, um keinen Verbindungsabbruch während eines Zellenwechsels zu erleiden. Es gibt keine Richtlinie, wie ein Roaming laut Standard 802.11 durchgeführt werden soll und so gibt es herstellerseitig verschiedene Strategien, wann und vor allem wie ein Zellwechsel eines Clients stattfindet, Ramlow und Peterhanwahr (2008).

### 2.2.1 Frequenzbereiche und Kanäle

WLAN-Wellen liegen wie bereits erwähnt in den Frequenzblöcken bei 2,400 - 2,4835 GHz, 5,150 - 5,350 GHz und 5,470 - 5,725 GHz, siehe Abbildung 2.5. Nahe an diesem Frequenzbereich arbeiten auch viele andere Funktechniken (UMTS, Bluetooth).

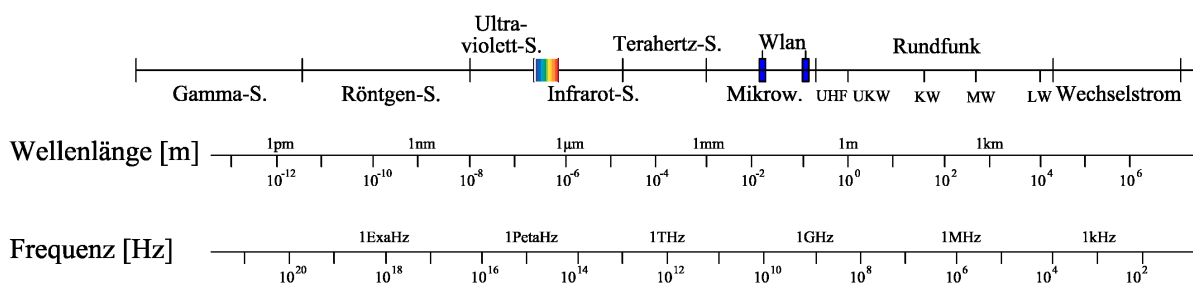


Abbildung 2.5: Elektromagnetische Spektrum mit 2,4 GHz und 5 GHz Frequenzbereichen dargestellt als blaue Rechtecke

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Technologien, die nahe beim WLAN-Frequenzbereich arbeiten. Für einen störungsfreien Betrieb sollte in der näheren Umgebung keine weitere Anlage mit derselben Frequenz senden. Vor allem aber bei 2,4 GHz sind einige Geräte angesiedelt, wie z.B. Bluetooth, Mikrowellenherde, aber auch viele Funkfernbedienungen verwenden diesen Frequenzbereich. Des Weiteren werden die Frequenzbänder bei einem WLAN in sogenannten Kanälen unterteilt, beispielsweise sind es im 2,4 GHz Bereich 13 Kanäle mit einem Abstand von jeweils 5 MHz, hier gibt es jedoch regionale Unterschiede, Metter und Bucher (2007).

Tabelle 2.1: Übersicht der Frequenzbereiche, aus Metter und Bucher (2007)

| Erläuterung          | Frequenz [GHz]    | Wellenlänge [cm] |
|----------------------|-------------------|------------------|
| WLAN / ISM           | 2,400 - 2,484     | 12,5 - 12,1      |
| WLAN / UNII          | 1-3 5,150 - 5,725 | 5,8 - 5,2        |
| WLAN / ISM           | 5,725 - 5,825     | 5,2 - 5,1        |
| Mobilfunknetz (UMTS) | 1,920 - 2,170     | 15,2 - 13,6      |
| Bluetooth            | 2,402 - 2,480     | 12,5 - 12,1      |
| Mikrowellenherd      | 2,450             | 12,2             |
| Nachbereichsradar    | 2,700 - 3,400     | 11,1 - 8,8       |
| Wetterradar          | 5,625 - 10,500    | 5,3 - 2,6        |

### 2.2.2 Wellenausbreitung

Elektromagnetische Wellen werden bei WLAN im Infrastruktur-Modus vom Access Points zu den Clients gesendet. Im Prinzip will man zu einer Positionierung des Users, mittels des Trilaterationsansatzes, den Abstand vom Client zum Access Point mit der empfangenen Signalstärke ableiten.

Die Schwingungen elektrischer und magnetischer Ladungen breiten sich im Optimalfall kugelförmig um den Sender (Access Point) in Lichtgeschwindigkeit aus. Diese Wellen werden nach ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge, wie bereits oben näher erläutert unterschieden und charakterisieren die Ausbreitungseigenschaften. Die empfangene Signalstärke  $P_r$  kann als Funktion von, vgl. Ramlow und Peterhanwahr (2008).

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSPL - D_{\text{extern}} - D_{\text{Hindernisse}} \quad (17)$$

mit folgenden Variablen gesehen werden:

$P_t$  ... Sendeleistung,

$G_t, G_r$  ... Antennengewinn (Sender und Empfänger),

$FSPL$  ... Freiraumdämpfung (abhängig von Abstand und Frequenz),

$D_{\text{extern}}$  ... Dämpfung von externen Störeinflüssen (Temperatur, Luftdruck, etc.),

$D_{\text{Hindernisse}}$  Dämpfung von physikalischen Hindernissen (Wände, Türen, Personen, etc.).

#### 2.2.2.1 Sendeleistung

Die Sendeleistung wird in der Praxis sehr oft in der Einheit *Dezibel-Milliwatt* angegeben. Die Einheit *Bel* ist eine logarithmische Größe und definiert sich über den Bezug mit einem

bestimmten Referenzwert. Im Fall von *Dezibel-Milliwatt (dBm)* ist die Referenzgröße *1 Milliwatt (mW)*,

$$P[\text{dBm}] = 10 * \log_{10}\left(\frac{P[\text{mW}]}{1\text{mW}}\right) \quad (18)$$

Die maximal abgestrahlte Leistung darf laut Standard *IEEE 802.11g* einen Wert von 20 dBm *Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP)*, im Frequenzblock von 2,4 GHz nicht überschreiten, Metter und Bucher (2007). Dies bedeutet, dass auch eine Richtantenne in keiner Richtung stärker strahlen darf, als eine isotrope Antenne, in die 20 dBm gespeist wird.

Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung berechnet sich mit:

$$EIRP = P_s + G_t \quad (19)$$

und kann mit folgenden Variablen gesehen werden:

$P_s$  ... in die Antenne eingespeiste Leistung ,  
 $G_t$  ... Antennengewinn gegenüber einen Isotropstrahler.

Die Tabelle 2.2 zeigt die verschiedenen EIRP der unterschiedlichen Frequenzen bei WLAN.

Tabelle 2.2: Maximale Strahlungsleistung, IEEE 802.11b/h/g

| Frequenzbereich [GHz] | EIRP [dBm] | EIRP [mW] |
|-----------------------|------------|-----------|
| 2,400 - 2,4835        | 20         | 100       |
| 5,150 - 5,350         | 23         | 200       |
| 5,470 - 5,725         | 30         | 1000      |

Die Sendeleistung kann unter anderem auch indirekt durch den User verändert werden, wenn sich ein Roaming ereignet(in Kapitel 2.2 beschrieben). Die Access Points ändern auch die Funkleistung durch entsprechende Regelungsmechanismen vom Hersteller, sodass die Signalstärke den gewünschten Anforderungen der Clients entspricht.

### 2.2.2.2 Antennengewinn

Der Antennentyp spielt eine wesentliche Rolle in der Ausbreitung der WLAN-Signale bzw. in der empfangenen Signalstärke am Smartphone. Der Antennengewinn,

$$G[\text{dBi}] = 10 * \log_{10}(D_R) = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_R}{P_0}\right) \quad (20)$$

mit:

- $D_R$  ... Richtfaktor,  
 $P_R$  ... Leistung in Senderichtung,  
 $P_0$  ... Kugelstrahlerleistung,

wird vom Richtfaktor abgeleitet, in der Maßeinheit  $dBi$  ausgedrückt, wobei der Zusatz  $i$  den Vergleich zu einem isotropen Kugelstrahler bedeutet, Ramlow und Peterhanwahr (2008). Der Richtfaktor ist das Verhältnis der Sendeleistung einer bestimmten Richtung zum Bezug eines isotropen Kugelstrahlers. Bei einer directionalen Antenne ergeben sich im vertikalen und horizontalen Strahlungsdiagramm mehrere keulenförmige Ausbuchtungen, siehe Abbildung 2.6.

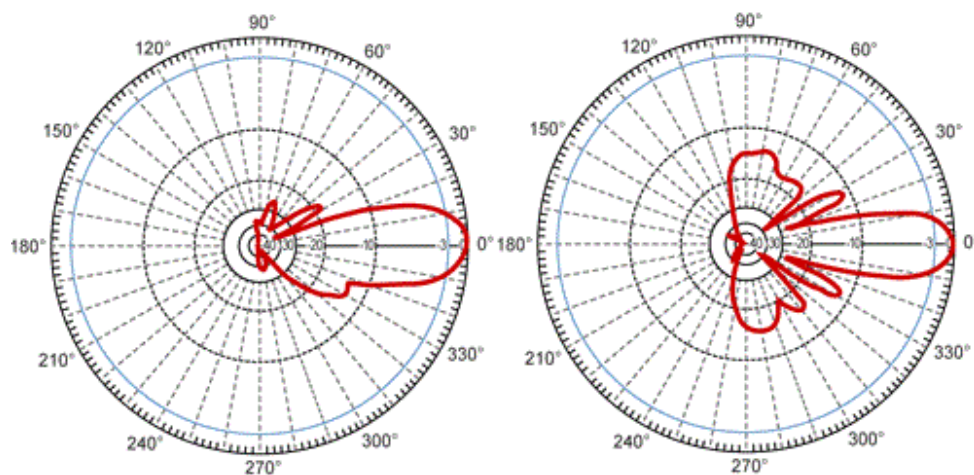


Abbildung 2.6: Strahlungsdiagramm einer Patchantenne, links: Vertikales, rechts: Horizontales Diagramm, Quelle: <http://www.l-com.com>

Zu Positionierungszwecken mittels Trilateration wäre eine omnidirektionale Antenne mit einem geringen Richtfaktor wünschenswert, jedoch kommen in einigen Fällen auch Richt- oder Patchantennen zur praktischen Anwendung, was einen richtungsunabhängigen Längenzusammenhang unmöglich macht. Außerdem weisen Rundstrahlantennen zwar horizontal ein gleichmäßiges Strahlungsdiagramm auf, zeigen aber in vertikaler Ebene zwei kegelförmige Ausbuchtungen, was räumlich gesehen einer Donutform nahekommt.

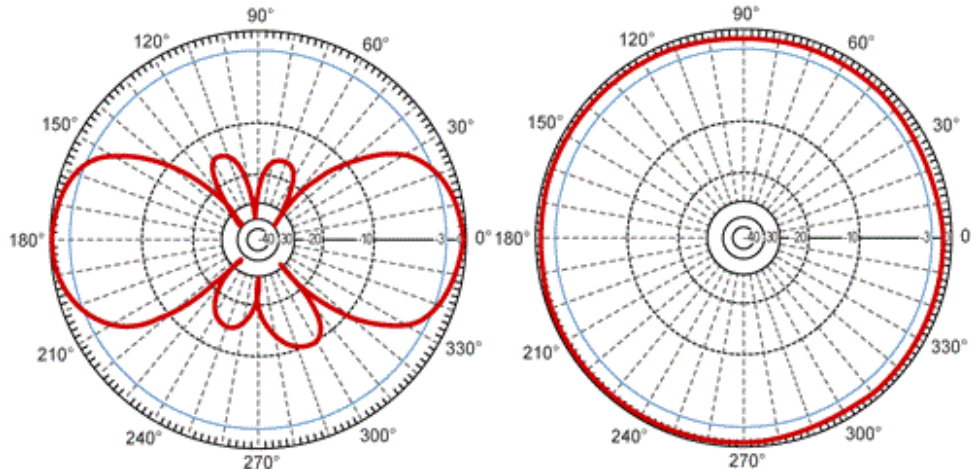


Abbildung 2.7: Strahlungsdiagramm einer Rundstrahlantenne, links: Vertikales, rechts: Horizontales Diagramm, Quelle: <http://www.l-com.com>

In Tabelle 2.3 sind einige unspezifische Größenordnungen des Antennengewinns verschiedener Typen numerisch aufgelistet.

Tabelle 2.3: Antennengewinn, Quelle: Ramlow und Peterhanwahr (2008).

| Antennentyp | Gewinn [dBi] |
|-------------|--------------|
| Rundstrahl  | 2-8          |
| Patch       | 8            |
| Parabol     | 20           |

### 2.2.2.3 Freiraumdämpfung

Die Freiraumdämpfung beschreibt mittels der Friis-Übertragungsgleichung, die auftretende Dämpfung in Abhängigkeit der Distanz und der Wellenlänge, unter idealen theoretischen Bedingungen, Luntovskyy et al. (2012)

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (21)$$

$$FSPL[dB] = 32,5 + 20 * \log_{10}(f) - 20 * \log_{10}(d) \quad (22)$$

mit:

$\lambda$  ... der Wellenlänge in Megahertz,

$d$  ... der Distanz zwischen Sender und Empfänger in Kilometer.

In Formel 21 kann gesehen werden, dass die Energie mit dem Quadrat der Distanz zum Sender abnimmt. Dieser theoretische Zusammenhang gilt für direkte Sichtverbindungen (*Line of Sight, LOS*), zwischen Sender und Empfänger. Der Antennengewinn ist hierbei

ausgenommen. Für praktische Bedingungen kann aus Formel 22 ein empirisches Log-Distanz-Modell erweitert werden, da auch bei LOS-Signalen eine Reflexion bzw. Dämpfung an Objekten eintritt. Dieses empirische Modell, sowie weitere Ausbreitungsmodelle werden in Kapitel 2.2.3 näher beschrieben.

#### **2.2.2.4 Externe Störeinflüsse**

Der Einfluss von Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit spielt in der Ausbreitung von WLAN-Wellen im Indoor Bereich nur eine geringe Rolle, da einerseits kurze Signalwege vorkommen und andererseits Dämpfungseffekte, die im Folgenden beschrieben werden, einen weitaus größeren Störeinfluss verursachen.

#### **2.2.2.5 Physikalische Rahmenbedingungen**

Bei der Ausbreitung von WLAN-Funkwellen spielen Absorptions- und Reflexionseffekte eine wesentliche Rolle und haben einen großen Einfluss auf die empfangene Signalstärke. Die folgenden Effekte treten vor allem beim Durchschreiten zwischen zwei unterschiedlichen Medien auf:

- Absorption: Umwandlung der Energie in eine andere Form (z.B. Wärme).
- Beugung: Veränderung der Ausbreitungsrichtung der Wellen durch eine Kante oder einen schmalen Spalt.
- Refraktion: Änderung der Ausbreitungsrichtung.
- Reflexion: Zurückwerfen der Welle, vorwiegend bei glatten Oberflächen.
- Streuung: Zurückwerfen der Wellen in unterschiedlichen Richtungen und Stärken, vorwiegend bei rauen Oberflächen.

In Abbildung 2.8 sind Effekte der Wellenausbreitung graphisch dargestellt. Bei einer Distanzberechnung mittels der Signalstärke, ist hier nicht nur die Tatsache von Bedeutung, dass sich der Strahlenweg im Gegensatz zu einer geradlinigen Verbindung zwischen Sender und Empfänger verlängert (Beugung und Refraktion), sondern macht die Dämpfung des Signals, eine weitaus größere Beeinträchtigung im Ergebnis der Distanzberechnung aus (Absorption oder Streuung).

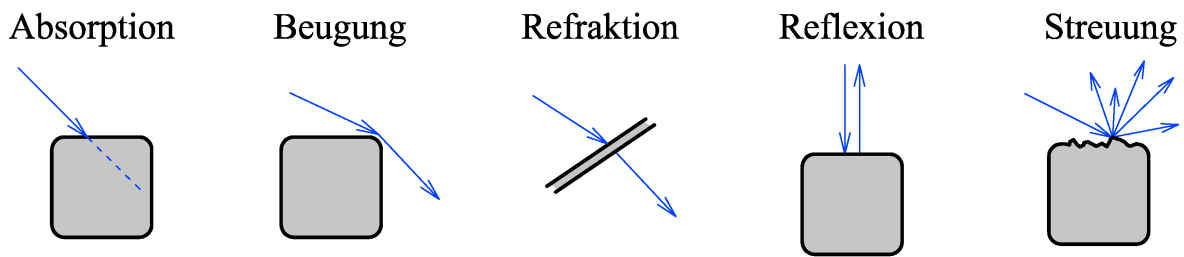


Abbildung 2.8: Effekte bei der Wellenausbreitung

In Tabelle 2.4 sind Dämpfungswerte unterschiedlichster Materialien aufgelistet. Hierbei ist nicht nur das Material selbst von Bedeutung, sondern die Ausführungsart (Bewehrung im Beton) hat einen maßgebenden Einfluss auf die Dämpfung des Signals, Ramlow und Peterhanwahr (2008).

Tabelle 2.4: Dämpfungswerte bei einer Signalfrequenz von 2,4 GHz, Quelle: Ramlow und Peterhanwahr (2008)

| Material         | Dämpfung [dB] |
|------------------|---------------|
| Dünne Mauer      | 2 - 5         |
| Ziegelwand       | 6 - 12        |
| Betonwand        | 10 - 20       |
| Doppelverglasung | 25 - 35       |
| Betondecke       | 20 - 40       |

Ein weiterer Effekt ist die Interferenz, wo es bei einer Überlagerung von Wellen mit gleicher Frequenz zu einer Verstärkung oder auch Auslöschung kommt. Dies kann einerseits mit, wie in Tabelle 2.1 dargestellten, anderen technischen Geräten passieren, andererseits auch bei ESS wo mehrere Access Points ungünstiger Weise im selben Frequenz-Kanal betrieben werden, Luntovskyy et al. (2012). Des Weiteren muss in der Praxis berücksichtigt werden, dass nicht nur ein Effekt auftritt, sondern es zu verschiedenen Effekten in unterschiedlicher Reihenfolge kommt(z.B. Strahlenführung bei schmalen Korridoren).

Ein wesentlicher Bestandteil der Signaldämpfung wird auch durch den menschlichen Körper des Users hervorgerufen. Die Resonanzfrequenz von Wasser beträgt 2,4 GHz, also genau jener von WLAN-Signalen im ersten Frequenzblock. Da der menschliche Körper ca. zu 70% aus Wasser besteht, wird die empfangene Signalstärke vom User wesentlich beeinträchtigt. Hierbei spielt nicht nur die permanente, unmittelbare Nähe des Users zum Smartphone eine Rolle, ein weit größeres Problem ist die Tatsache, dass die Ausrichtung des Users zum Access Point sehr veränderlich ist. Dies macht die Userdämpfung zu einem sehr schwierig zu modellierenden Effekt und kann nur in einer iterativen Positionierung berücksichtigt werden. Kaemarungsi und Krishnamurthy (2004) beschreibt in

einem Paper einen Abschwächung des Signals von 9,32 dB bei LOS- bzw. von 5,81 dB bei NLOS-Beobachtungen. In Kapitel 4.4 wird der Einfluss des Users, in einem praktischen Messszenario näher untersucht.

### 2.2.3 Ausbreitungsmodelle

Wie bereits erwähnt, kommt es bei der Ausbreitung von Wellen zu vielen Effekten, die sich bei einer Distanzableitung aus der empfangenen Signalstärke negativ im Ergebnis (Distanz zwischen Access Point und User) niederschlagen. Eine genaue Modellierung dieser Dämpfungs- und Verstärkungseffekte ist sehr schwierig, da sich in Gebäuden viele verschiedenste physikalische Objekte befinden, die die Ausbreitung der WLAN-Wellen auf unterschiedlichste Art beeinflussen. Im Folgenden wird die Theorie einiger Ausbreitungsmodelle dargestellt, welche diese mehr oder weniger aufwendig berücksichtigen. Prinzipiell kann bei den Ausbreitungsmodellen zwischen empirischen und deterministischen Modellen unterschieden werden.

#### 2.2.3.1 One-Slope-Modell

Das One-Slope-Modell ist ein sehr einfaches empirisches Modell, welches auf dem Prinzip der Freiraumdämpfung aufbaut. Die Dämpfung hängt nur von der logarithmischen Entfernung zwischen Sender und Empfänger und der Referenzsignalstärke ab:

$$P(d) = P_0 + 10\gamma * \log_{10}(d) \quad (23)$$

mit:

$P$  ... empfangene Signalstärke

$P_0$  ... Referenzsignalstärke bei 1m Entfernung,

$\gamma$  ... Dämpfungsfaktor,

$d$  ... Entfernung zwischen Sender und Empfänger.

In Tabelle 2.5 sind verschiedene Koeffizienten für den 2,45 und 5,25 GHz Bereich dargestellt. Wie hier gesehen werden kann, ist der Dämpfungsfaktor bei den verschiedenen Bereichen sehr variabel, weshalb es bei dieser sehr einfachen Methode auch zu sehr großen Fehlern kommen kann, Luntovskyy et al. (2012).

Tabelle 2.5: Parameter One-Slope-Modell, Quelle: Luntovskyy et al. (2012)

|             | f [GHz] | $P_0$ | $\gamma$ |
|-------------|---------|-------|----------|
| Bürogebäude | 2,45    | 40,2  | 4,2      |
| Korridore   | 2,45    | 40,2  | 1,2      |
| Bürogebäude | 5,25    | 46,8  | 4,6      |



In Kapitel 4.5.1 werden diese beiden Koeffizienten ( $L_0$ ,  $\gamma$ ) in einem Ausgleichsverfahren mittels praktischer Signalstärkemessungen mit unterschiedlichsten Smartphones bestimmt.

### 2.2.3.2 Multi-Wall-Modell

Dieses semi-empirische Ausbreitungsmodell ist speziell für den Indoor-Bereich entwickelt. Semi-empirisch bedeutet, dass die Umgebung in das Berechnungsmodell miteinbezogen wird. Dadurch sind realistischere Ergebnisse als im vorherigen Modell zu erwarten. Bei einfacher Umgebung können gute Ergebnisse erzielt werden, jedoch sind bei kleinen Strukturen (z.B. Säulen, Stiegenaufgängen, unterschiedlichen Materialien in den Wänden) die Grenzen dieses Modells bald erreicht, Luntovskyy et al. (2012). Das Multi-Wall-Modell berücksichtigt die Dämpfungseigenschaft von vorhandenen Wänden zwischen Sender und Empfänger, wobei immer der direkte Weg zwischen Sender und Empfänger angenommen wird. Je nach Wandmaterial wird ein entsprechender Dämpfungswert verwendet. Abbildung 2.9 zeigt eine schematische Darstellung des Multi-Wall-Ausbreitungsmodells bei welchem drei Wände zum Einsatz kommen.

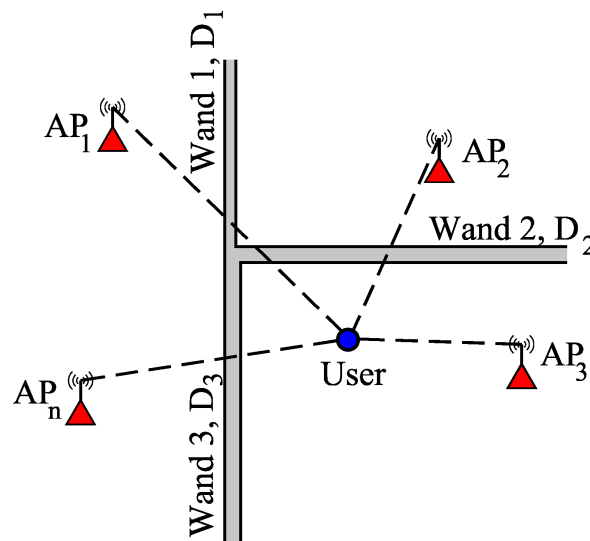


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung des Multi-Wall-Modells

Wie man in der schematischen Darstellung erkennen kann, ist jede einzelne Signalstärke auf unterschiedlichste Weise betroffen. So können einerseits mehrere Dämpfungswerte an einem Signal auftreten, andererseits sind auch LOS-Beobachtungen möglich. Die Berechnung des Multi-Wall-Modells erweitert sich zum One-Slope-Modell mit der Summe aus den einzelnen Signaldämpfungen der Wände:

$$P_{MW} = P_0 + 10\gamma * \log_{10}(d) + \sum_{i=1}^n D_i \quad (24)$$

mit:

- $P_{MW}$  ... empfangene Signalstärke
- $P_0$  ... Referenzsignalstärke bei 1m Entfernung,
- $\gamma$  ... Dämpfungsfaktor,
- $d$  ... Entfernung zwischen Sender und Empfänger.
- $D_i$  ... Dämpfungswert der i-ten Wand.

In Kapitel 4.5.2 werden, wie im vorherigen Modell, in einem praktischen Szenario die Koeffizienten ( $L_0, \gamma$  und  $D_i$ ) in einem Ausgleichsverfahren mittels praktischen Signalstärkenmessungen bestimmt. In dieser Anwendung kommt es wie bereits erwähnt, bei kleinräumigen Strukturen zu Problemen, da eine klare Separation der unterschiedlichsten Dämpfungen in der Praxis nicht möglich ist. Ein weiterer Ansatz wäre die Dämpfung eines bestimmten Materials, in Abhängigkeit der Wandstärke, zu modellieren, Luntovskyy et al. (2012). Jedoch ist, wie bereits erwähnt die Ausführungsart (Bewehrung im Beton, etc.) ein maßgebender Faktor, der bei diesem Modell nicht berücksichtigt werden kann.

### 2.2.3.3 Ray Launching und Ray Tracing

Hierbei handelt es sich um deterministische und strahlenoptische Ausbreitungsmodelle, bei welchen die physikalischen Ausbreitungsgesetze (Absorption, Brechung und Reflexion) anhand von Objekten modelliert werden. Bei einer großen Anzahl an Objekten kommt es zu einer sehr hohen Berechnungszeit. Die beiden Modelle unterscheiden sich in einer unterschiedlichen Herangehensweise. Im ersten Fall dem Ray Launching (dt. Strahlenabschuss), werden von einem Sender isotrop in alle Richtungen die Strahlenverläufe und die resultierende Signalstärke berechnet, siehe Abbildung 2.10 links. Im zweiten Fall, dem Ray Tracing (dt. Strahlenverfolgung), wird von einem Empfangspunkt rückwärtig alle möglichen Strahlen zum Sender ermittelt, um danach den Energieverlust zu berechnen, Luntovskyy et al. (2012).

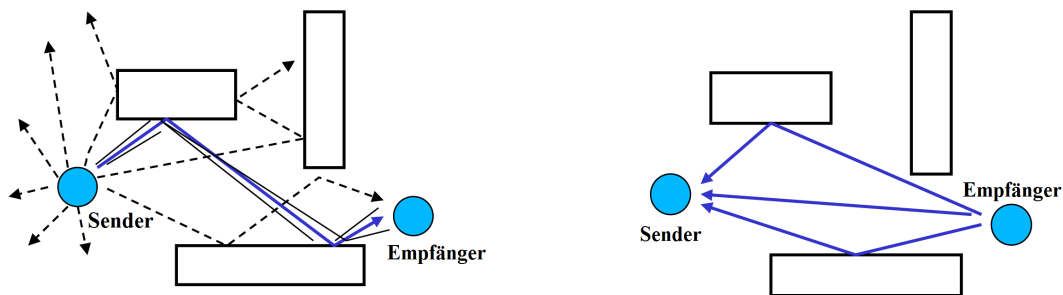


Abbildung 2.10: Ray Launching (links) und Ray Tracing (rechts)<sup>1</sup>

In einem Java basierenden Ray Tracing Simulator, von Aveneau et al. (2010) ist es möglich, Refraktion und Beugungseffekte von verschiedenen geometrischen Objekten mit unterschiedlichen Eigenschaften zu modellieren. In Abbildung 2.11 ist das Ergebnis einer Ray Tracing Simulation in einem Gebäude dargestellt.

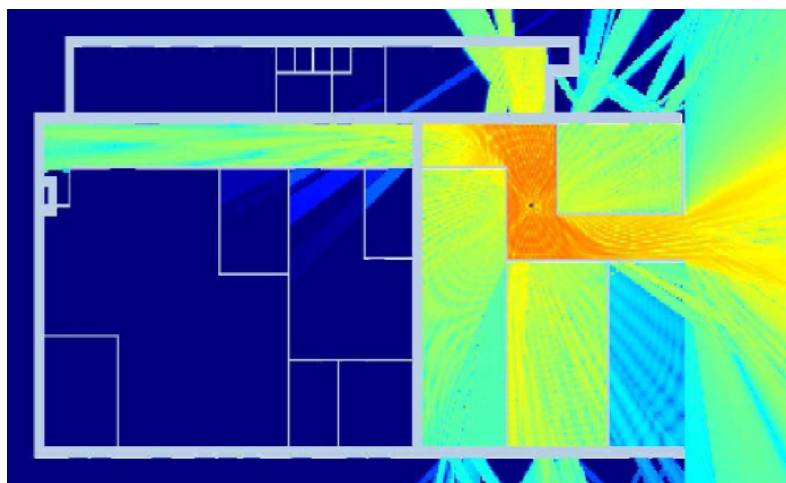


Abbildung 2.11: Ergebnis einer Ray Tracing Simulation, Quelle: Aveneau et al. (2010)

Für präzise Ergebnisse müssen die physikalischen Eigenschaften der Objekte genau bekannt und erfasst werden. Aufgrund der Tatsache, dass bei einer komplexen Umgebung die Berechnungszeit dramatisch ansteigt, kommt das Ray Launching bzw. Ray Tracing vorwiegend in der Planung von drahtlosen Netzwerken zum Einsatz. Darüber hinaus stellt die zeitliche Veränderung der physikalischen Umgebung, z.B. das Öffnen von Türen oder Fenstern oder die Anwesenheit von Personen einen nicht zu unterschätzenden Unschärfefaktor dar.

<sup>1</sup>Online: [http://www.rn.inf.tu-dresden.de/lectures/Rechnerpraxis/rnp\\_4.pdf](http://www.rn.inf.tu-dresden.de/lectures/Rechnerpraxis/rnp_4.pdf), aufgerufen am 5. September 2015

**Zusammenfassung**

Das Kapitel zeigte die unterschiedlichen Technologien und Methoden, welche in der Indoor-Positionierung eingesetzt werden. Der große Vorteil von WLAN gegenüber den restlichen Technologien liegt in der Tatsache, dass in vielen öffentlichen Gebäuden, in welchen die Positionierung von großem Interesse ist, die WLAN-Infrastruktur bereits vorhanden ist. Mittels WLAN-Signal sind grundsätzlich drei Positionierungsmethoden möglich. Bei dieser Arbeit wird die Trilateration in einem differenziellen Ansatz erweitert, um durch die Hinzunahme von Referenzstationsdaten in den Signalstärkenscans des Users zeitliche Variationen zu minimieren und in der Positionierung wesentliche Verbesserungen zu erzielen. Im zweiten Teil dieses Kapitels wurden die technischen Grundlagen des WLAN's, sowie die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen präsentiert. Die vorgestellten Ausbreitungsmodelle, welche im folgenden Kapitel mit praktischen Scans evaluiert werden, stellen einen Zusammenhang zwischen den gescannten WLAN-Signalstärken und den Längen zwischen User und den jeweiligen Access Points her.

## 3 Systemkomponenten

Das Positionierungssystem besteht grundlegend aus drei Komponenten. Erstens dem Netzwerk der Access Points, welche das WLAN-Signal aussenden. Zweitens aus den Referenzstationen, welche dieses Signal permanent scannen und drittens dem User, der mit seinem Smartphone ebenfalls das WLAN-Signal empfängt, um letztendlich seine Position zu bestimmen.

### 3.1 Access Point

In öffentlichen Gebäuden kann sehr oft auf bereits vorhandene Infrastruktur eines WLAN-Netzwerkes zurückgegriffen werden, was wie bereits erwähnt, einen außerordentlichen Vorteil bietet. Darüber hinaus ist es nicht erforderlich, sich in das WLAN zu registrieren und einzuloggen. Jedoch müssen die Lage (3D-Koordinate), sowie die dazugehörigen MAC Adressen, jedes einzelnen Access Points bekannt sein. Eine gute Abdeckung ist bei der Methode der Trilateration vorteilhaft, sodass zumindest an jedem Ort die Signale von drei Access Points empfangen werden können.



Abbildung 3.1: WLAN Access Point der Marke *Cisco*, Modell *AIR-CAP2702E-E-K9*, Quelle: [www.cisco.com](http://www.cisco.com)

Abbildung 3.1 zeigt einen WLAN Access Point der Marke *Cisco*, Modell *AIR-CAP2702E-E-K9*. In den praktischen Messung im TU-Gebäude der Gußhausstraße 27-29, ist neben dem dargestellten Modell in Abbildung 3.1, auch das Modell *AIR-CAP2602E-E-K9* zur Anwendung gekommen.

## 3.2 Referenzstation

Die Referenzstation liefert eine Zeitserie der Signalstärken aller empfangenen WLAN-Signale. In den praktischen Messungen kommt ein *Raspberry Pi Modell B+*, mit einem WLAN USB-Stick, der Marke *Edimax EW-7811Un* zur Anwendung. Raspberry Pi ist ein Einplatinencomputer in der Größe einer Kreditkarte (Dimension 85 x 56 x 17 mm), siehe Abbildung 3.2. Der WLAN-USB-Stick und Raspberry Pi sind derzeit für rund 50 Euro im Elektrofachhandel erhältlich. Als Systemsoftware wurde *Raspbian Version 3.18* von der Herstellerwebsite<sup>2</sup> heruntergeladen und installiert.



Abbildung 3.2: Raspberry Pi, Modell B +, Quelle: [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org)

Durch ein vorhandenes Python Script<sup>3</sup>, wird der Linux-Befehl `iwlist wlan0 scanning` in eine formatierte Ausgabe gebracht. Dieses Script wird mit einer endlosen While-Schleife erweitert, welches einen Scan in einem Intervall von 2 Sekunden ausführt. Nach einer bestimmten Anzahl an Durchläufen werden die Daten der Scans in ein Txt-File exportiert. Dieses File ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Zur zeitlichen Identifikation wird der Zeitstempel, im Unixzeit-Format an der ersten Stelle jeder Zeile ausgegeben. Hierbei handelt es sich um fortlaufende Sekunden seit 1. Jänner 1970, wobei in meinem Fall mit Millisekunden gearbeitet wurde. Zur Identifikation des Access Points werden die SSID und die MAC-Adresse in 2. bzw. 3. Spalte ausgegeben. Neben der Signalstärke in der 4. Spalte, wird die Qualität in der 5. Spalte, wie auch die Frequenz in letzter Spalte, ausgegeben. Die Signalstärke der WLAN-Signale wird in ganzzahligen Prozent angegeben.

Da die Raspberry's im Einsatz ohne Bildschirm und Tastatur verwendet werden, kam

<sup>2</sup>Online: [http://downloads.raspberrypi.org/raspbian\\_latest.torrent](http://downloads.raspberrypi.org/raspbian_latest.torrent), aufgerufen am 30. März 2015

<sup>3</sup>Online: <https://bbs.archlinux.org/viewtopic.php?id=88967>, aufgerufen am 3. April 2015

einerseits ein automatischer Login nach jedem reboot zur Anwendung und andererseits wird das oben beschriebene Python-Skript mit Hilfe eines *Cronjobs* (dient zum automatisierten Ablauf von Linux-Befehlen) gestartet. Zusätzlich wird nach jedem Neustart die Internetverbindung zu einem persönlichen Hotspot aufgebaut, um die Systemzeit von der Raspberry-Konsole aktuell zu halten.

|               |           |                   |       |      |           |
|---------------|-----------|-------------------|-------|------|-----------|
| 1437715143113 | tunet     | F4:0F:1B:B5:4F:53 | 96 %  | 44 % | 2.462 GHz |
| 1437715143113 | tunet     | 0C:27:24:6C:6B:F3 | 100 % | 72 % | 2.462 GHz |
| 1437715143113 | tunet     | F4:0F:1B:B5:4F:03 | 92 %  | 43 % | 2.462 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | 0C:68:03:48:D4:10 | 96 %  | 45 % | 2.412 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | 0C:68:03:4C:A5:F0 | 96 %  | 42 % | 2.437 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | 0C:27:24:6C:6B:F0 | 96 %  | 70 % | 2.462 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | F4:0F:1B:BF:51:00 | 92 %  | 43 % | 2.412 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | F4:0F:1B:B5:4F:50 | 96 %  | 44 % | 2.462 GHz |
| 1437715143113 | eduroam   | F4:0F:1B:B5:4F:00 | 94 %  | 42 % | 2.462 GHz |
| 1437715145074 | wlanipsec | 0C:68:03:48:D4:11 | 95 %  | 47 % | 2.412 GHz |
| 1437715145074 | wlanipsec | 0C:68:03:4C:A5:F1 | 96 %  | 42 % | 2.437 GHz |
| 1437715145074 | wlanipsec | F4:0F:1B:BF:51:01 | 82 %  | 43 % | 2.412 GHz |

Abbildung 3.3: Ausschnitt aus dem Raspberry Txt-File

### 3.3 Benutzer

Prinzipiell wäre es möglich die Positionsbestimmung des Users mit jedem Gerät durchzuführen, welches es ermöglicht, Signalstärken eines WLAN-Netzwerkes aufzuzeichnen (Tablet, Laptop, Smartphone, etc.). Bei den durchgeführten praktischen Messungen kamen drei Smartphones der Marke *Samsung* Modell *Ace* und Modell *Galaxy* sowie der Marke *HTC* Modell *Desire X* zur Anwendung.



Abbildung 3.4: Verwendete Smartphones, links: Samsung Ace, mitte: HTC , rechts: Samsung Galaxy

Als Applikation am Smartphone kam ein App zur Anwendung, welches vom Informatikstudent Herrn Hofer entwickelt wurde, Hofer (2015). Mit Hilfe dieser App ist es möglich, Signalstärken mittels zwei Varianten aufzuzeichnen. Bei erster Variante dem WiFi-Scanner wird eine definierte Anzahl von Scans an einem Punkt durchgeführt. Zur späteren Identifizierung kann man eine Punkt ID, sowie eine Richtung ID eingeben, siehe Abbildung 3.5 links. Bei der zweiten Variante ist es möglich Signalstärken permanent aufzuzeichnen, um kinematische Bewegungen des Users zu erfassen, siehe Abbildung 3.5 rechts. Zur späteren Auswertung im Postprocessing werden auch Routinen zum Datenimport in Matlab verwendet, welche ebenfalls von Herrn Hofer entwickelt wurden, Hofer (2015).

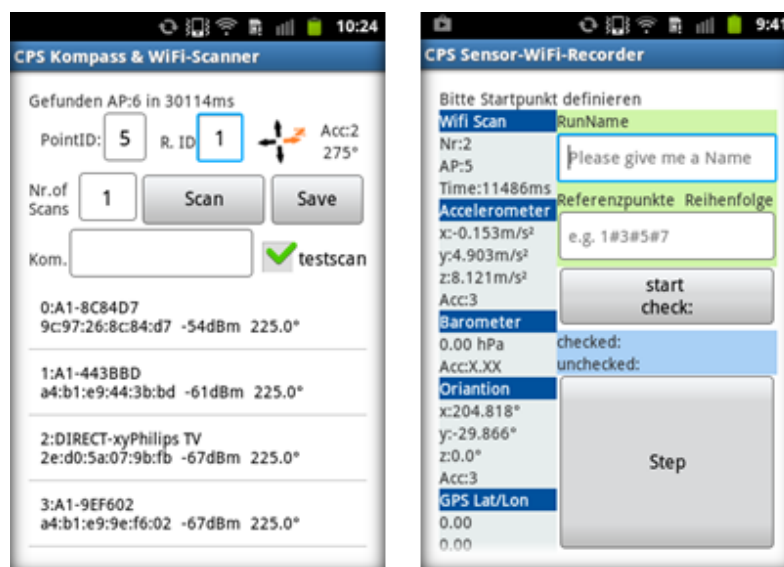


Abbildung 3.5: Applikation am Smartphone, links: WiFi Scanner, rechts: WiFi Recorder

## Zusammenfassung

Dieses Kapitel diente der Beschreibung der Komponenten des Indoor-Positionierungssystems. Zuerst wurden die Access Points, die das WLAN-Signal aussenden, dargestellt. Das Messgebiet, die Koordinaten der AP und die dazugehörigen MAC-Adressen werden im folgenden Kapitel 4 erläutert. In weiterer Folge wurden die Raspberry Pi's, die als Referenzstationen fungieren präsentiert, sowie die entwickelte Software und das Datenfile näher beschrieben. Letztendlich wurden die drei Smartphones und die verwendete Applikation dargelegt.



## 4 Vorbereitende Analysen und das Messgebiet

Im folgenden Kapitel werden die Rahmenbedingungen der praktischen Anwendung, des Positionierungssystems beschrieben. In weiterer Folge werden diverse Analysen, wie die Langzeitbeobachtungen der Referenzstationen, der Zusammenhang zwischen Smartphones- und Raspberry-Signalstärken, der Einfluss der Userorientierung, sowie der inverse Längenzusammenhang mittels diverser Ausbreitungsmodelle dargestellt.

### 4.1 Messgebiet

Die praktischen Messungen der Indoor-Positionierung wurden im Foyer des TU-Gebäudes, der Gußhausstraße 27-29, vom 24. bis 25. Juni 2015 durchgeführt. Es handelt sich generell um einen sehr offenen Gebäudebereich, in welchem ein Hörsaal abgegrenzt ist.



Abbildung 4.1: Photo 1: Foyer des TU-Gebäudes, der Gußhausstraße 27-29

In den beiden Darstellungen 4.1 und 4.2 ist die Messumgebung photographisch abgebildet. Die Raumhöhe beträgt im Foyer, wie auch im Hörsaal ca. 5 m, wobei im Foyer ein Bereich mit einer Zwischentage vorhanden ist, siehe Abbildung 4.1.



Abbildung 4.2: Photo 2: Hörsaal VII des TU-Gebäudes, der Gußhausstraße 27-29

Die vorhandene Infrastruktur des WLAN-Netzwerkes ist bei den Signalstärkenmessungen genützt worden. Es befinden sich sechs Access Points in guter Aufteilung und in unmittelbarer Umgebung des Messgebietes. Im ersten Schritt wurde die Lage dieser Access Points, in einem lokalen Koordinatensystem, mit Hilfe von Gebäudeplänen<sup>4</sup>, bestimmt. Die Koordinaten der verwendeten AP, sowie die dazugehörigen MAC-Adressen sind in Tabelle 4.1 numerisch abgebildet.

Tabelle 4.1: Koordinaten und Mac-Adresse der verwendeten Access Points

| AP     | X [m]  | Y [m] | Z [m]  | MAC-Adresse       |
|--------|--------|-------|--------|-------------------|
| CDEG-1 | 131.17 | 41.79 | 102.71 | f4:0f:1b:bf:52:20 |
| CDEG-2 | 123.15 | 62.20 | 104.30 | f4:0f:1b:b5:4f:00 |
| CDEG-3 | 147.30 | 62.07 | 104.60 | f4:0f:1b:b5:4f:50 |
| CDEG-4 | 148.00 | 50.83 | 102.85 | f4:0f:1b:bf:51:00 |
| CDEG-5 | 148.00 | 35.37 | 102.85 | d0:c7:89:24:b2:70 |
| CDEG-6 | 111.56 | 51.30 | 104.60 | 0c:27:24:6c:6b:f0 |

Abbildung 4.3 zeigt die Übersicht des gesamten Messbereiches. Die Access Points sind in roten Dreiecken und die Referenzstationen in blauen Quadraten symbolisiert.

<sup>4</sup>Online: [https://www.gut.tuwien.ac.at/fileadmin/t/lm/Plaene/Code\\_CA\\_-\\_CI/CABCD/CABCD\\_EG.pdf](https://www.gut.tuwien.ac.at/fileadmin/t/lm/Plaene/Code_CA_-_CI/CABCD/CABCD_EG.pdf) aufgerufen am 27. April 2015

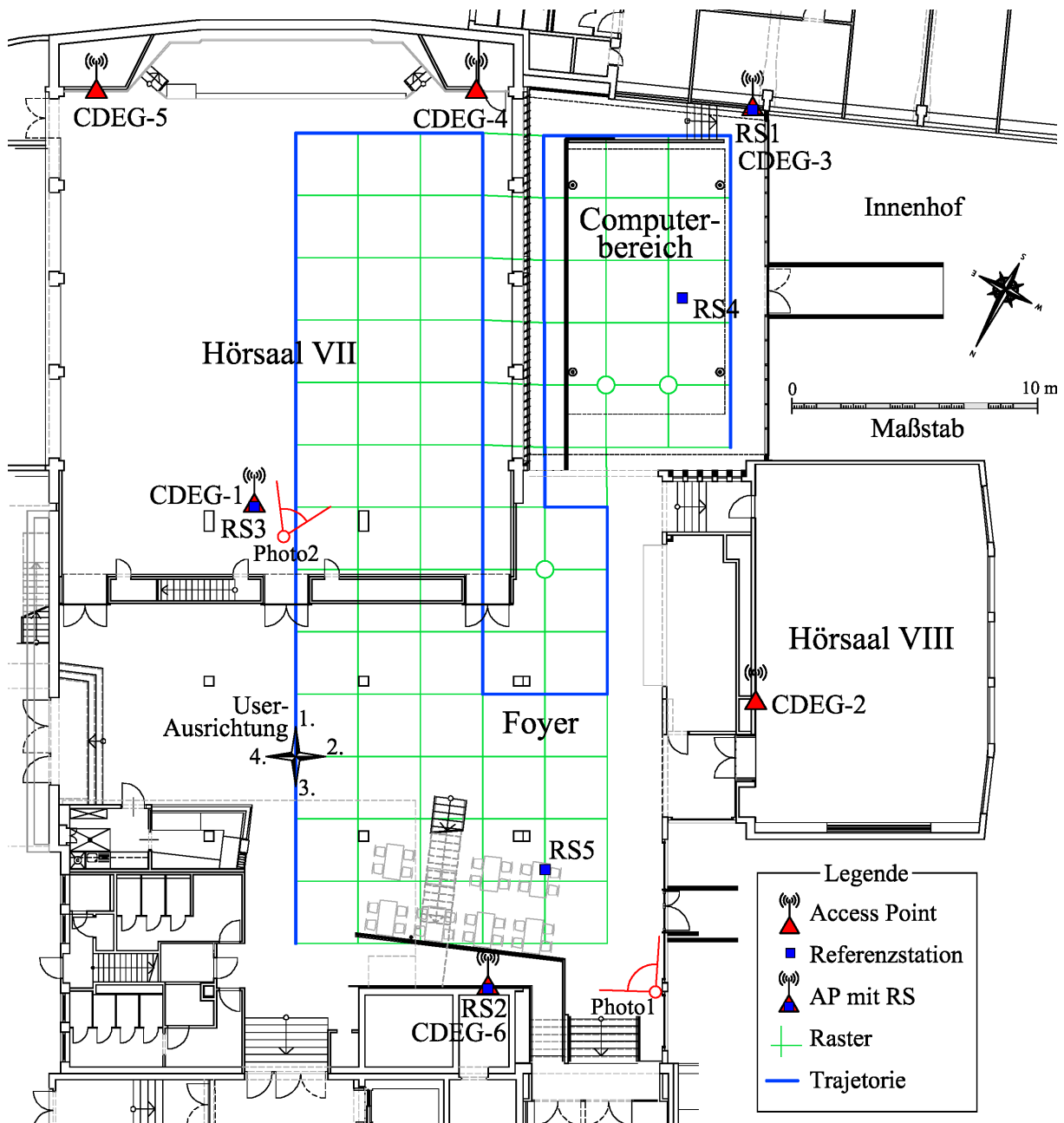


Abbildung 4.3: Übersichtsplan des Messgebietes

Es wurden mehrere Durchgänge gemessen, wobei die drei Referenzstationen an unterschiedlichen Standpunkten positioniert wurden. Einerseits befinden sich die Referenzstationen unter einem Access Point (RS1, RS2, RS3), andererseits an bekannten freien Positionen (RS4, RS5), an einer Höhe von ca. 1 m über dem Fußboden. Die Koordinaten der Referenzstationen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die beiden Standpunkte der Photographien (Abbildung 4.1 und 4.2) sind ebenfalls im Übersichtsplan erkenntlich gemacht.

Tabelle 4.2: Koordinaten der Referenzstationen

|     | X [m]  | Y [m] | Z [m]  |
|-----|--------|-------|--------|
| RS1 | 147,30 | 62,07 | 100,96 |
| RS2 | 111,56 | 51,30 | 101,70 |
| RS3 | 131,17 | 41,79 | 100,86 |
| RS4 | 139,62 | 59,21 | 100,98 |
| RS5 | 116,37 | 53,62 | 100,83 |

In erster Linie sind mit drei Smartphones, welche in Kapitel 3.3 näher beschrieben sind, statische Messungen des Users in einer Rasteranordnung durchgeführt worden. Der Rasterabstand beträgt 2,52 m und wurde in der Praxis mit Hilfe der Fugen von Bodenfließen realisiert. Der Raster ist im Übersichtplan mittels grünen Linien signalisiert. An jedem Schnittpunkt des Rasters wurden in vier Ausrichtungen des Users die Signalstärken aller verfügbaren AP gescannt. In weiterer Folge wurde entlang der dargestellten Trajektorie, Signalstärkenscans in einer gehenden Bewegung des Users ausgeführt. Die Trajektorie befindet sich direkt am Raster und ist in Abbildung 4.3 als blaue Linie gekennzeichnet.

## 4.2 Raspberry Zeitreihen

Bei der praktischen Untersuchung kommen drei Raspberry Pi's, welche in Kapitel 3.2 beschrieben sind, als Referenzstationen zum Einsatz, welche permanent die Signalstärken der WLAN-Signale scannen. Bei der Auswahl der Standorte ist auf eine gute Anordnung (gleichseitigen Dreieck) und auf eine gute Überdeckung der Rasterpunkte geachtet worden, siehe Abbildung 4.3. Wie bereits erwähnt, wurden in zwei Durchgängen die Raspberry's an unterschiedlichen Standorten positioniert, wobei RS3 sich immer bei AP *CDEG-1* befand. Das Scanintervall beträgt 2 Sekunden und es wurde über einen Zeitraum von zwei Tagen aufgezeichnet. In Abbildung A.1 ist die Signalstärke, der Referenzstation RS3 des ersten Tages, des Service Set Identifiers (SSID) *eduroam* dargestellt. Die Signalstärken der restlichen SSID (*tunet*, *tunetguest*, *wlanipsec*) zeigen einen nahezu identen Verlauf.

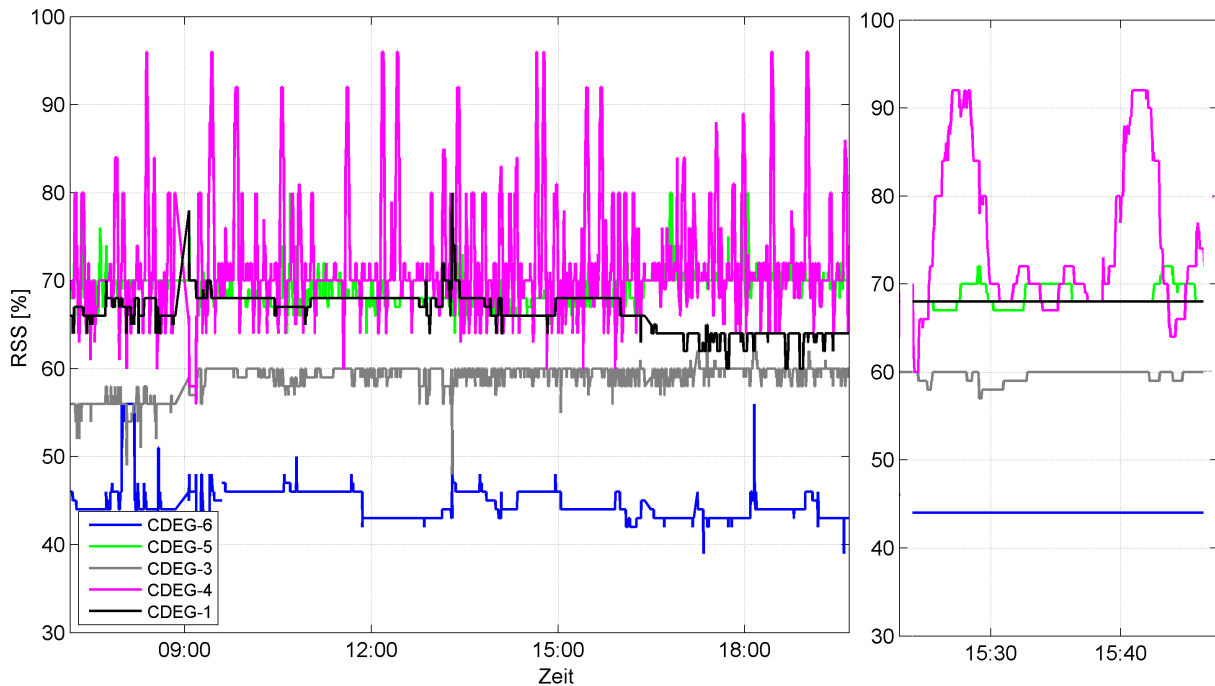


Abbildung 4.4: : Zeitreihe der Signalstärke von Raspberry 3 über den ersten Messtag, mit einem Detailausschnitt von 20 min

Diese Darstellungen liefern sehr bedeutende Informationen des zeitlichen Signalstärkenverlaufs der WLAN-Signale. Die Zeitreihen der restlichen Raspberry's befinden sich im Anhang. RS3 befindet sich bei einer geringen Anwesenheit von Personen im Hörsaal, in einem sehr großen freien Raum, siehe Abbildung 4.3. Trotzdem weist der RSS-Wert von *CDEG-4*, welcher eine LOS-Beobachtung darstellt, sehr große Variationen auf. In der Detailabbildung 4.4 ist eine Änderung der Signalstärke von 30 %, des AP *CDEG-4* in einem kurzem Zeitraum von 5 Minuten erkennbar. Dies könnte auf einen Interferenzeffekt hinweisen, jedoch weist die Signalstärke dieses Access Points bei RS2 nur geringe zeitliche Variationen auf, siehe A.2.

Abbildung 4.5 zeigt den Signalstärkenverlauf ebenfalls von RS3, in der Nacht vom 24. zum 25. Juli 2015. Hier ist bei einigen AP (*CDEG-1*, *CDEG-3*, *CDEG-6*) eine erkennbare Verminderung der zeitlichen Variation der Signalstärke erkennbar. Jedoch ist bei *CDEG-4* und *CDEG-5* eine gleichartiger Verlauf, wie über den Tag zu sehen.

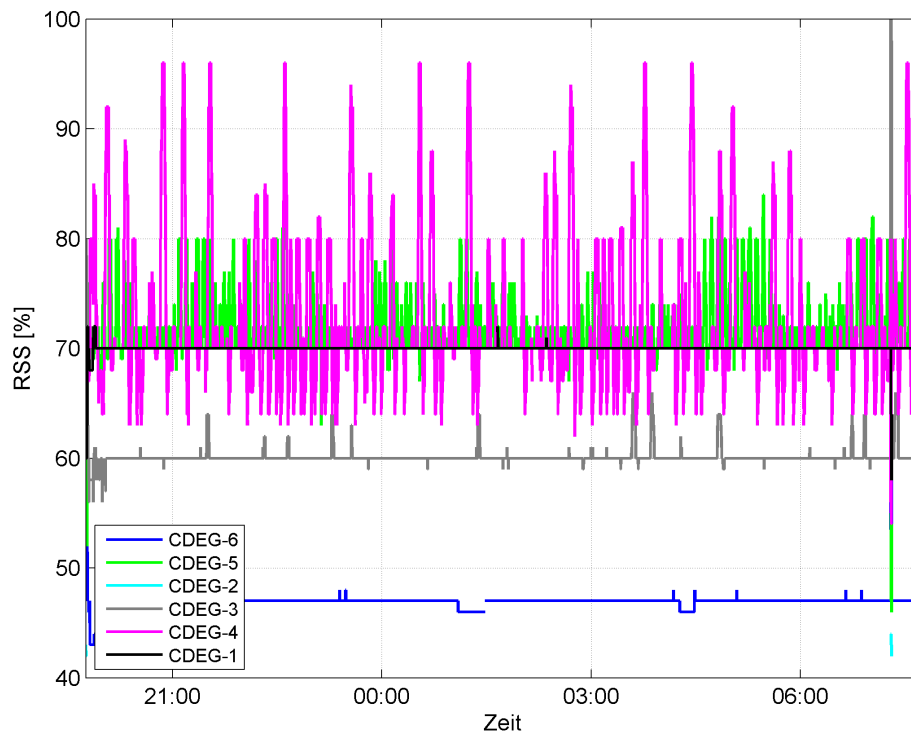


Abbildung 4.5: : Zeitreihe der Signalstärke von Raspberry 3, über die Nacht vom 24. zum 25. Juli 2015

In Abbildung 4.6 ist ein Vergleich aller drei Raspberry Pi's, mit den RSS der Access Point's, welche sich über den drei Referenzstationen befinden, dargestellt. Der Linientyp kennzeichnet die unterschiedlichen Referenzstationen (RS1, RS2, RS3), an denen das Signal empfangen wurde. Die Signalstärke von *CDEG-1* ist bei RS2 nur sehr schwach und teilweise mit langen Unterbrechungen aufgezeichnet. Ebenfalls treten bei RS1 und RS2 von *CDEG-1* idente Maxima's auf, jedoch nicht an RS3, der sich direkt unter diesem Hot Spot befindet. Grundsätzlich liefern die drei Raspberry's von identen AP sehr unterschiedliche Variationen der Signalstärken. Dies macht die Positionierung, auf Basis von WLAN-Signalstärken sehr schwierig, da die zeitliche Veränderung nicht klar von der räumlichen Variation separierbar ist.

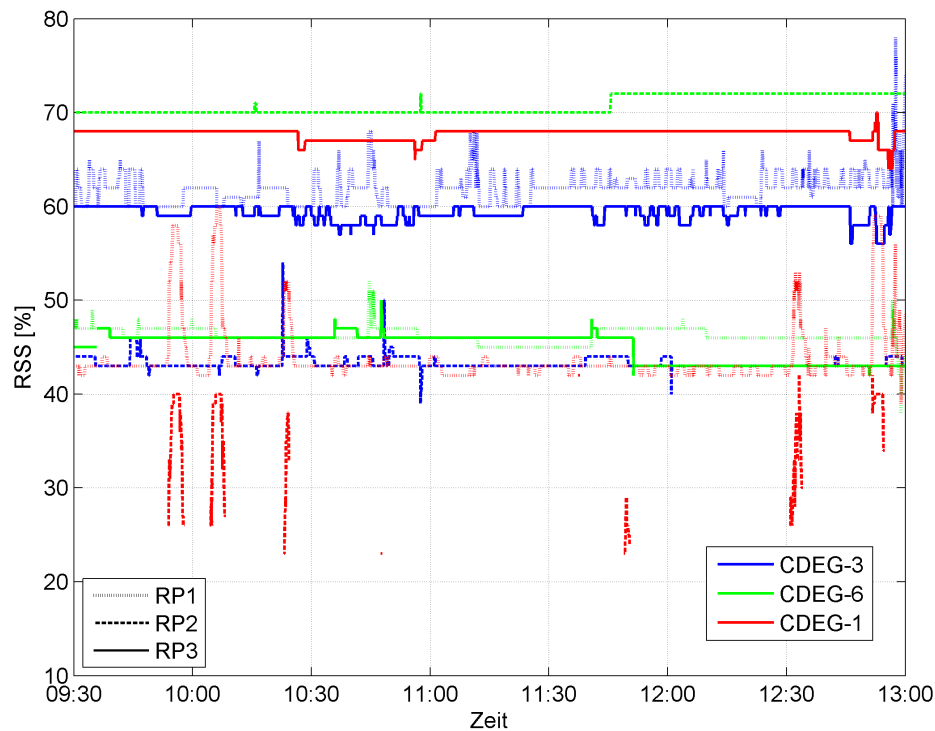


Abbildung 4.6: Vergleich der Signalstärken der drei Raspberry's

### 4.3 Zusammenhang Raspberry und Smartphone

Grundsätzlich wird die Signalstärke in der logarithmischen Einheit Dezibel-Milliwatt (dBm) dargestellt, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Die empfangenen WLAN-Signalstärken befinden sich in der Regel zwischen -35 dBm (stark) bis -95 dBm (schwach). Prinzipiell gibt es keine physikalische Einheit, die im IEEE Standard definiert ist, die den Umgang mit RSS regelt. In der Praxis verwenden die Hersteller verschiedene Prozentmodelle, welche den Umgang mit RSS klar regeln, (Bardwell, 2002). In Tabelle 4.3 sind einige Signalstärken in Dezibelmilliwatt, in drei unterschiedlichen Hersteller-Prozentangaben dargestellt.

Tabelle 4.3: Prozentzusammenhang verschiedener Hersteller

| RSS [dBm]     | -50 | -70 | -90 |
|---------------|-----|-----|-----|
| Atheros [%]   | 45  | 25  | 5   |
| Cisco [%]     | 55  | 40  | 22  |
| Microsoft [%] | 100 | 60  | 20  |

Um einen Konsens der Signalstärken zwischen Referenzstation und den einzelnen Smartphones herzustellen, werden in einem praktischen Versuchsaufbau Scans durchgeführt, um einen empirischen Zusammenhang beider Geräte zu finden. Hierbei ist es möglich,

abhängige Eigenschaften des Smartphones (Antenne, Cover), welche den Signalstärkempfang von WLAN-Signal signifikant beeinflussen, herauszufinden und entsprechend zu berücksichtigen.

Das Smartphone wurde in einem geringen Abstand (15 cm) zur Raspberrykonsole positioniert. Es wurden 20 Scans am Smartphone, an zwei separaten Punkten, in der Abwesenheit des User's durchgeführt. An jedem Punkt wurden die Scans am Smartphone an der gegenüberliegenden Seite wiederholt, sodass gegenseitige Abschattungseffekte beider Geräte eliminiert wurden. In Abbildung 4.7 sind die korrespondierten Signalstärken der einzelnen MAC-Adressen ersichtlich. Die horizontale Achse beschreibt die RSS von Raspberry und die vertikale Achse, die des Smartphones *Samsung Ace*. Aus diesen 20 Scans wurde der Mittelwert, wie auch die Standardabweichung (rote Linien) bestimmt. Die zwei Ausrichtungen der Smartphones um die Raspberrykonsole wurden mit verschiedenen Farben der Punktsymbole gekennzeichnet. Es ist erkennbar, dass ein Unterschied von max. 10 dBm, durch einen geringen Positionswechsel des Handy's auftritt, aber auch am Raspberry ist eine Differenz von 5 % aufgetreten.

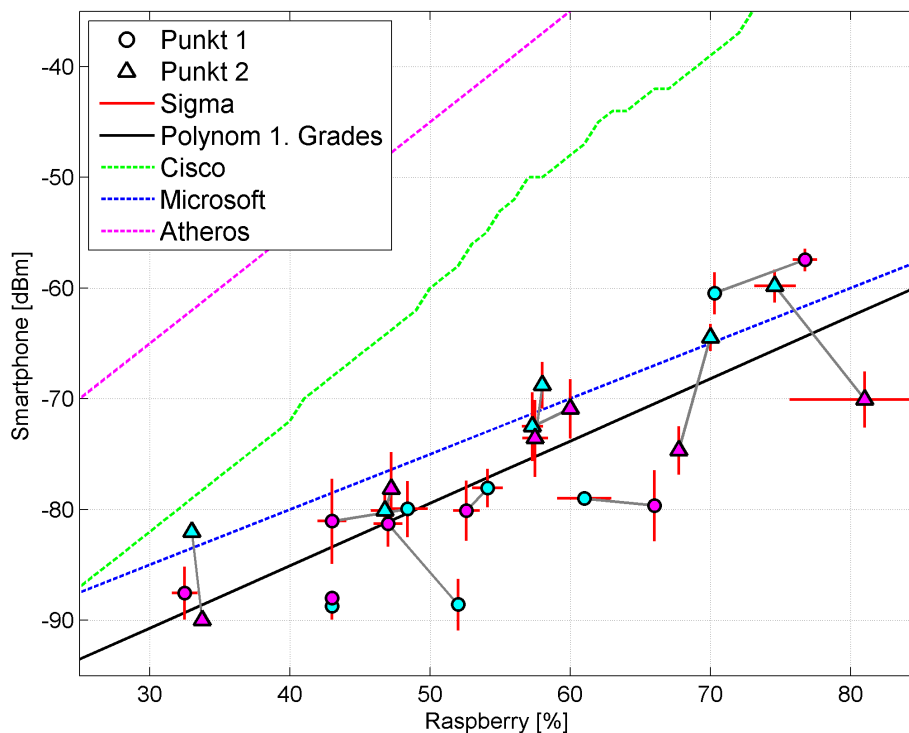


Abbildung 4.7: Zusammenhang der Signalstärken zwischen Raspberry und Smartphone *Samsung Ace*

Aus den beiden geringfügig geänderten Positionen der Smartphones wurde der Mittelwert gebildet, in Abbildung 4.7 durch eine graue Linie dargestellt. Aus diesen Mittelwerten wurde ein lineares Polynom approximiert, welches bei allen weiteren Berechnungen den



Zusammenhang zwischen Raspberry- und den jeweiligen Smartphone-Signalstärken bildet. Die Koeffizienten der drei verschiedenen Smartphones, sowie der lineare Korrelationskoeffizient sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Koeffizienten der Polynom-Approximation und der lineare Korrelationskoeffizient

|                | 0.Grades | 1.Grades | lin. Korrelationskoeff. |
|----------------|----------|----------|-------------------------|
| Samsung Ace    | -107,58  | 0,56289  | 0,828                   |
| Samsung Galaxy | -102,55  | 0,61823  | 0,841                   |
| HTC Desire X   | -101,99  | 0,54356  | 0,803                   |

Der Korrelationskoeffizient liegt bei allen drei Smartphones bei ca. 0,80, was auf mittelmäßige Abweichungen zur approximierten Funktion schließen lässt, die auch in Abbildung 4.7 zu sehen sind. Die beiden Abbildungen von *Samsung Galaxy* und *HTC Desire X* befinden sich im Anhang, siehe Abbildung A.5 und A.6. Das Smartphone *Samsung Ace* weist einen Offset zu den anderen beiden Geräten auf und im Polynom des *Samsung Galaxy* ist eine größere Steigung zu den anderen beiden erkennbar. Alle drei Handy's liegen aber sehr nahe am Microsoft-Modell.

## 4.4 Userorientierung

Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, spielen die physikalischen Rahmenbedingungen eine wesentliche Rolle im Signalstärkenempfang. Anhand praktischer Messungen werden die Dämpfungseffekte des menschlichen Körpers als User näher untersucht. Dazu wurden an zwei Standorten Signalstärkenscans in alle Userausrichtungen, in einem Intervall von  $10^\circ$ , getätigt. Pro Ausrichtung wurden 7 Scans durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet. In Abbildung 4.8 links, sind die empfangenen Signalstärken über die Ausrichtung zum Access Point über  $360^\circ$  geplottet. Die RSS zu den einzelnen AP wurden dabei so korrekt verschoben, dass die horizontale Achse des Plots die Ausrichtung vom User zum jeweiligen AP widerspiegelt. Um die zeitliche Variation der WLAN-Signale zu berücksichtigen, wurden die Raspberry-Scans zur Differenzenbildung genutzt, siehe Abbildung 4.8 rechts. Das Smartphone *HTC Desire X* verfügt über keine Richtungssensoren, somit konnte diese Experiment nicht durchgeführt werden.

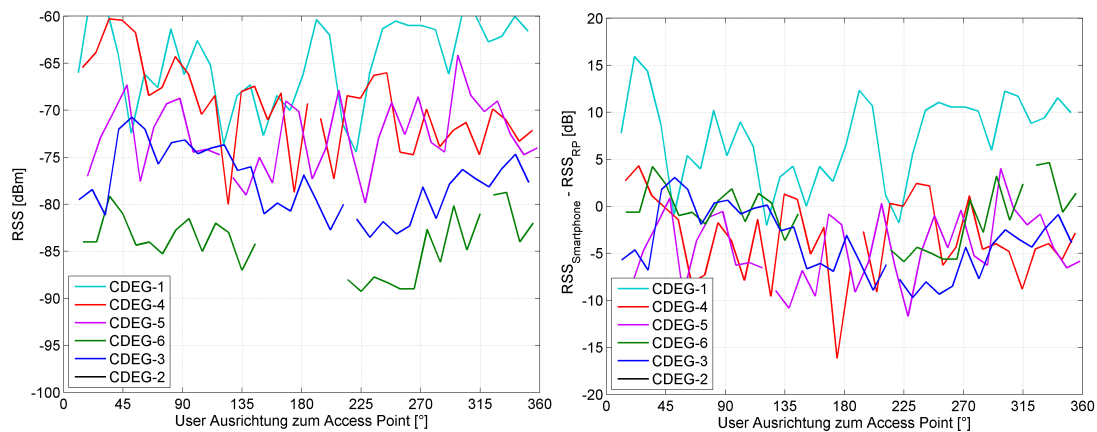


Abbildung 4.8: Signalstärken am ersten Standpunkt mit dem Smartphone *Samsung Ace* (links), die dazugehörige Differenzenbildung mit Raspberry (rechts)

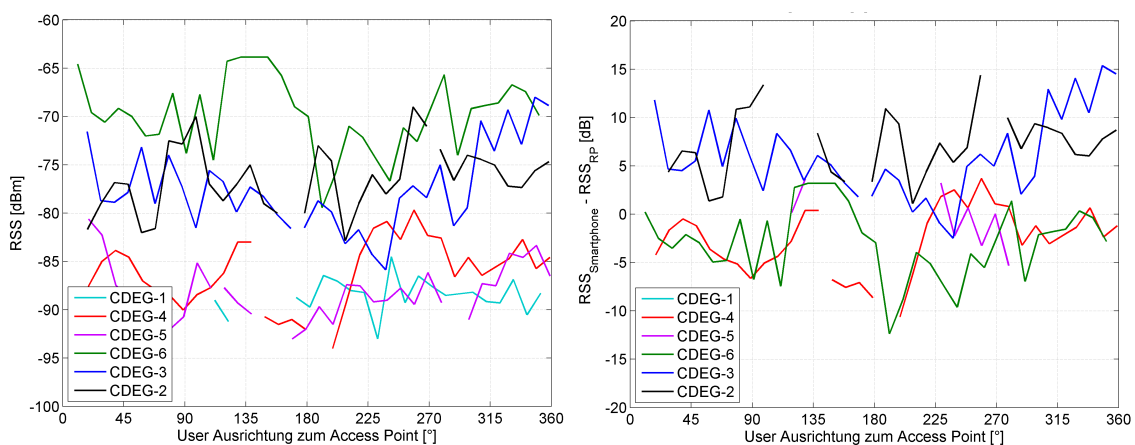


Abbildung 4.9: Signalstärken am zweiten Standpunkt mit dem Smartphone *Samsung Ace* (links), die dazugehörige Differenzenbildung mit Raspberry (rechts)

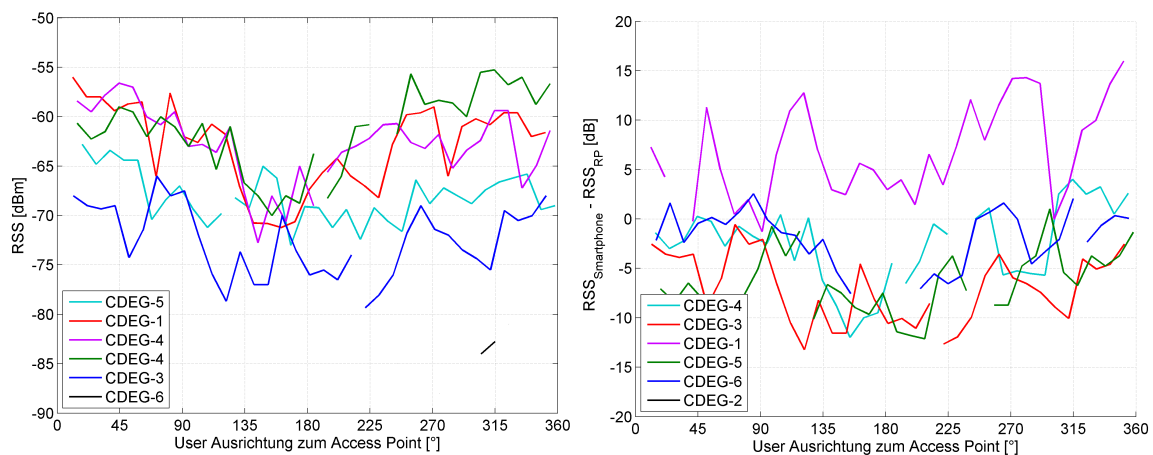


Abbildung 4.10: Signalstärken am ersten Standpunkt, mit dem Smartphone *Samsung Galaxy* (links), die dazugehörige Differenzenbildung mit Raspberry (rechts)

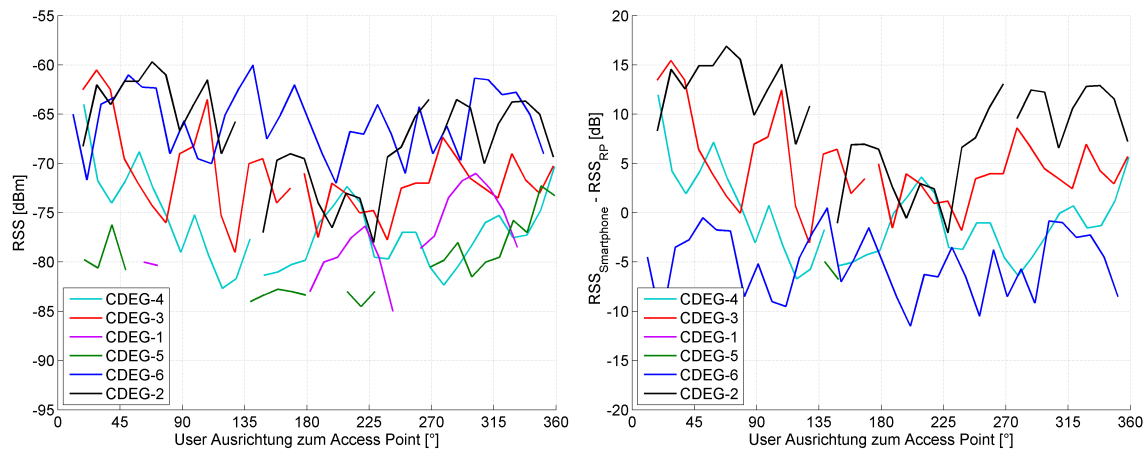


Abbildung 4.11: Signalstärken am zweiten Standpunkt, mit dem Smartphone *Samsung Galaxy* (links), die dazugehörige Differenzenbildung mit Raspberry (rechts)

Kaemarungsi und Krishnamurthy (2004) beschreiben eine durch den User hervorgerufene Dämpfung von 5,81 bis 9,32 dB. In den empfangenen Signalstärken der Smartphones sind generell, sowie in den Raspberry-Zeitreihen, sehr große Variationen zu erkennen. Daher wurde eine Differenzenbildung beider Signalstärken durchgeführt, wobei sich die Variationen nicht wesentlich abgeschwächt haben (10dB). Bei einigen Signalen kann, wenn sich der User mit der Rückseite zum AP befindet, ein Ausfall beobachtet werden. Natürlich kann somit auch keine Differenzenbildung an dieser Stelle stattfinden. Generell ist die Berücksichtigung dieses Dämpfungseffektes nur in einem iterativen Prozess möglich, da die Position, sowie die Ausrichtung des Smartphonennutzers vorab bekannt sein müssen. Im dargestellten Experiment konnte nicht gezeigt werden, dass ein signifikanter Dämpfungseffekt bei einer Abdeckung des AP durch den User eintritt. In Abbildung 4.10 und 4.11 des Smartphones *Samsung Galaxy* ist eine leichte Abschwächung der Signalstärke bei 180° Verdrehung des Users zum AP zu erkennen, jedoch ist der grundsätzliche Rauschenpegel der Signalstärke sehr hoch.

## 4.5 Längenzusammenhang

Das WLAN-Signal wird durch verschiedene Einflüsse der Umwelt signifikant beeinflusst. Um diesen Effekt zu veranschaulichen, bzw. die reale Abschwächung der Signalstärke bei zunehmender Länge herzustellen, werden die gescannten Signalstärken an den Rasterpunkten verwendet, um zwei Ausbreitungsmodelle (One-Slope- und Multi-Wall-Modell) empirisch anzuwenden. Die dreidimensionale Länge zwischen Smartphone und Access Point wurde zuvor aus den bekannten Rasterpunkten abgeleitet. An jedem Rasterpunkt wurden 5 Scans in 4 Orientierungen des Users durchgeführt. In weitere Folge werden auch

die Raspberrydaten miteinbezogen, um bei den zwei unterschiedlichen differenziellen Methoden den Längenzusammenhang zu evaluieren. Die nachfolgenden Graphiken zeigen die Signalstärken, die mit dem Smartphone *Samsung Ace* gescannt wurden. Die Darstellungen der beiden restlichen Handys befinden sich im Anhang, siehe A.3 und zeigen grundsätzlich sehr ähnliche Eigenschaften, wobei in Tabelle 4.10 ein Vergleich der drei Smartphones, zu den einzelnen Längeninvertierungen gezeigt wird.

### 4.5.1 One-Slope-Modell

In diesem Modell wird der Zusammenhang zwischen Signalstärken und Längen mit Hilfe einer logarithmischen Funktion beschrieben, siehe Formel 23. Die beiden Koeffizienten  $P_0$  und  $\gamma$  werden empirisch in einem Ausgleichsverfahren bestimmt. Abbildung 4.12 zeigt das Längendiagramm der einzelnen Rasterpunkte mit den gemittelten Signalstärkenwerten der 5 Scans und den 4 Orientierungen des Users. Die farblich gekennzeichneten Punktsymbole charakterisieren die verschiedenen AP's.

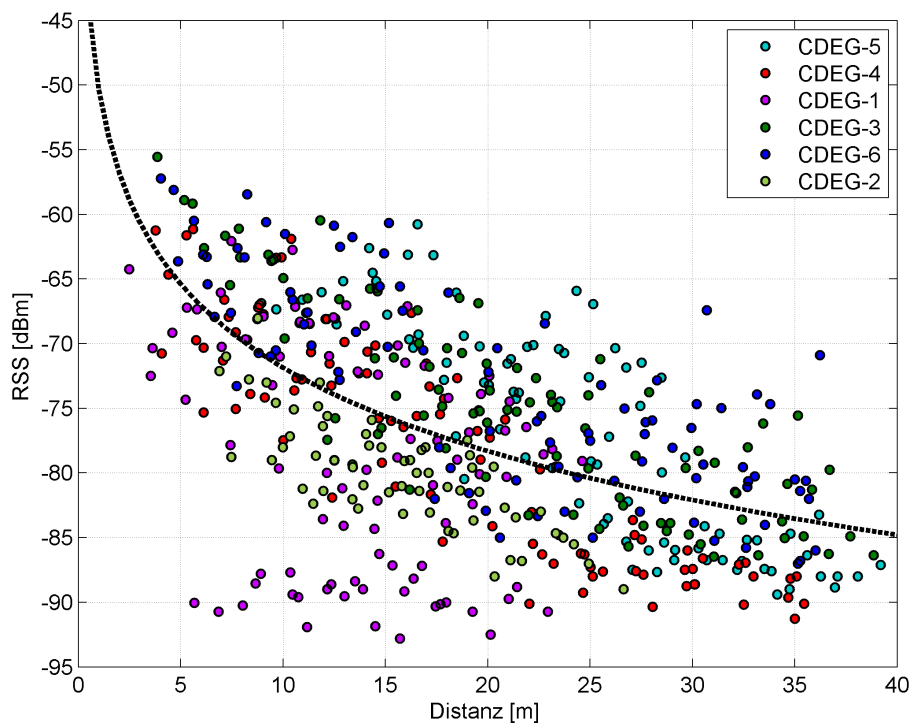


Abbildung 4.12: Längendiagramm der gescannten Signalstärken, mit dem Smartphone *Samsung Ace*

Hierbei sind beträchtliche Abweichungen (20 dB) zur geschätzten Funktion erkennbar. Des Weiteren ergeben sich bei einer Invertierung der RSS zu einer Länge, bei zu geringen Signalstärken, beträchtliche Distanzabweichungen (ca. 80m). In Tabelle 4.5 sind

die Koeffizienten der logarithmischen Distanzfunktion, sowie die Wurzel des dazugehörige Determinationskoeffizient  $R^2$ , der verschiedenen Smartphones, numerisch abgebildet. Grundsätzlich befinden sich die geschätzten Koeffizienten in der Größenordnung, wie in Tabellen 2.5 dargestellt. Der multiple Korrelationskoeffizient  $R$  ist ein Maß der Bestimmtheit, der geschätzten Funktionsparameter. In Tabelle 4.5 ist zu sehen, dass dieser Koeffizient vom Idealwert ( $\pm 1,00$ ) etwas entfernt liegt, was auf die große Streuung der Signalstärke zurückzuführen ist. Das Smartphone *Samsung Ace* besitzt ein Offset, welcher sich in  $P_0$  widerspiegelt. Dies bedeutet, dass bei gleichem Abstand zu den einzelnen AP's eine schwächere Signalstärke, als bei restlichen Smartphones aufgenommen wurde.

Tabelle 4.5: Koeffizienten des One-Slope-Modells und der multiple Korrelationskoeffizient

| Smartphone     | $P_0$   | $\gamma$ | $R$   |
|----------------|---------|----------|-------|
| Samsung Ace    | -50,374 | -2,1476  | 0,591 |
| Samsung Galaxy | -39,675 | -2,5552  | 0,663 |
| HTC Desire X   | -41,337 | -2,9464  | 0,678 |

## 4.5.2 Multi-Wall-Modell

Bei diesem Modell wird versucht, den Dämpfungseffekt der einzelnen Wände miteinzubeziehen. Im ersten Schritt werden die Signalstärken zwischen LOS- und NLOS-Beobachtungen getrennt. In weiterer Folge werden die NLOS-Signale den einzelnen Wänden zugeordnet, die Sie durchschreiten müssen. In unseren Räumlichkeiten wurden drei Wände definiert. Die erste Wand befindet sich zwischen Hörsaal VII und Foyer, die Zweite zwischen Hörsaal VII und dem Computerbereich und die Dritte zwischen Hörsaal VIII und Foyer, siehe 4.3. Es ist auch ein mehrfaches Durchschreiten einzelner Wände möglich. In Abbildung 4.13 sind verschiedenen Typen der Signalstärken farblich gekennzeichnet.

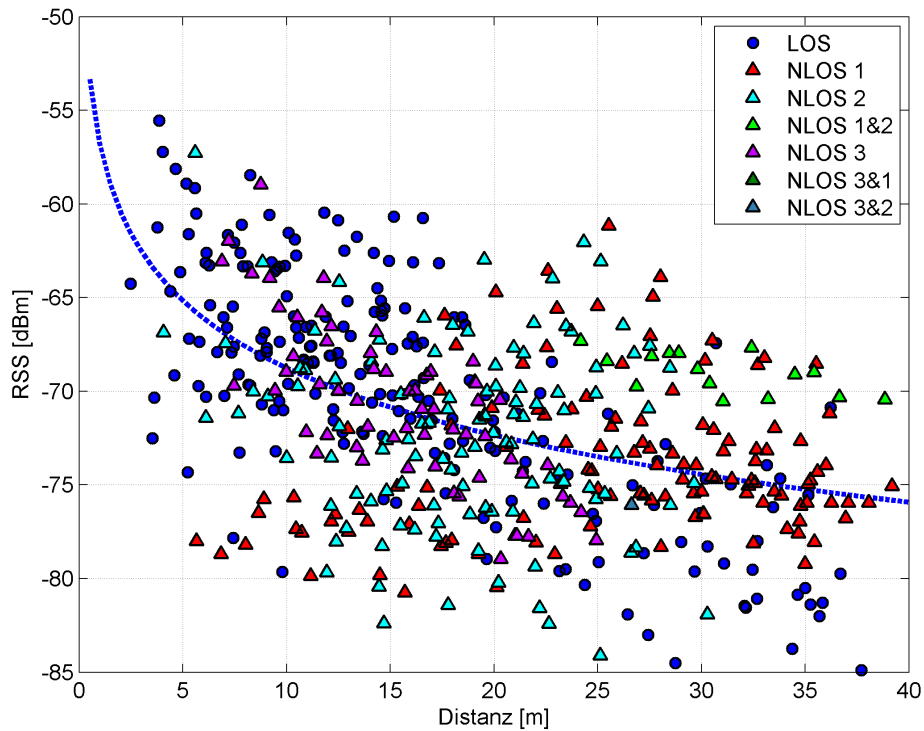


Abbildung 4.13: Längendiagramm der LOS- und NLOS-Signalstärken, mit dem Smartphone *Samsung Ace*

In einem gemeinsamen vermittelten Ausgleich wurden die Koeffizienten der logarithmischen Distanzfunktion, wie auch die drei Dämpfungswerte der Wände geschätzt. In Abbildung 4.13 ist die geschätzte logarithmische Distanzfunktion in blau strichliert dargestellt. Die dazugehörigen Koeffizienten der logarithmischen Funktion, sowie der dazugehörige multiple Korrelationskoeffizient sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Hierbei ist eine deutliche Verbesserung, des Korrelationskoeffizienten gegenüber dem One-Slope-Modell, bei jedem Smartphone zu erkennen. Bei der Referenzsignalstärke  $P_0$  ist eine Abnahme und im Dämpfungsfaktor  $\gamma$  eine Zunahme gegenüber dem One-Slope-Modell feststellbar. Ein Dämpfungsfaktor nahe dem Wert 0, liefert ein flacheres Auslaufen der Funktion, was eine geringere Distanzabhängigkeit zur Folge hat.

Tabelle 4.6: Koeffizienten des Multi-Wall-Modells und der multiple Korrelationskoeffizient

| Smartphone     | $P_0$   | $\gamma$ | $R$   |
|----------------|---------|----------|-------|
| Samsung Ace    | -56,839 | -1,1915  | 0,829 |
| Samsung Galaxy | -45,205 | -1,6796  | 0,885 |
| HTC Desire X   | -44,964 | 2,2274   | 0,876 |

In Tabelle 4.7 sind die Dämpfungswerte der drei Wände dargestellt. Hier sind bei jedem Smartphone sehr ähnliche numerische Dämpfungswerte erkennbar. Die dazugehörigen

Standardabweichungen liegen alle bei einer Größenordnung von rund 0,5 dB. Die Wand 2, welche sich zwischen Hörsaal VII und Computerbereich befindet, besteht aus großflächigen, dünnen Glaselementen, die einen geringeren Dämpfungswert als die beiden Wände aufweisen, die aus Vollbeton bestehen. Darüber hinaus kann eine Übereinstimmung, zu Tabelle 2.4 gesehen werden, wo typische Dämpfungswerte unterschiedlicher Wände aufgelistet sind.

Tabelle 4.7: Dämpfungswerte der drei Wände, mit den dazugehörigen Standardabweichungen

| Smartphone     | $D_1$  | $s_{D_1}$ | $D_2$ | $s_{D_2}$ | $D_3$  | $s_{D_3}$ |
|----------------|--------|-----------|-------|-----------|--------|-----------|
| Samsung Ace    | 12,048 | 0,546     | 3,883 | 0,511     | 9,047  | 0,67      |
| Samsung Galaxy | 11,554 | 0,478     | 2,690 | 0,434     | 11,467 | 0,551     |
| HTC Desire X   | 10,033 | 0,540     | 1,954 | 0,503     | 13,485 | 0,607     |

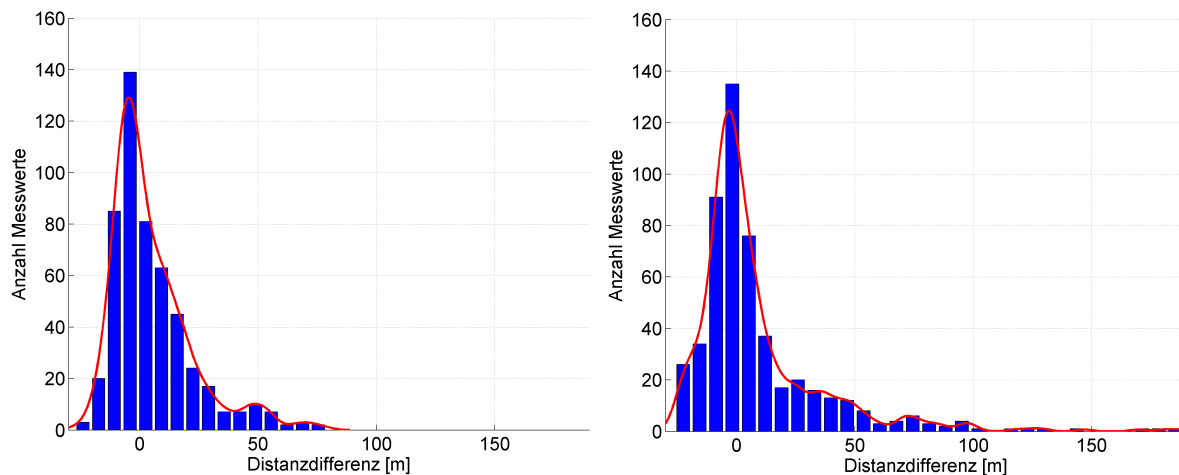


Abbildung 4.14: Histogramme der Längenabweichung, One-Slope-Modell (links) und Multi-Wall-Modell (rechts)

Die Histogramme in Abbildung 4.14 zeigen die Längenabweichungen, der invertierten Signalstärken mittels den beiden Modellen, zu den tatsächlichen Distanzen zwischen User und Access Point. In beiden Fällen ist eine Abweichung zur Normalverteilung erkennbar. Im Multi-Wall-Modell hat sich die Anzahl der geringen Abweichungen erhöht, jedoch sind einzelne große Abweichungen (bis ca. 180 m) hinzugekommen. Dieser Effekt ist einerseits durch schwache Signale und andererseits durch die Veränderung des Dämpfungsfaktor  $\gamma$  erklärbar, da die Funktion des Multi-Wall-Modell ab 20 m sehr flach ausläuft.

### 4.5.3 Differenzieller Ansatz, 1. Methode

Um die zeitliche Variation der Signalstärke und Ausbreitungsfehler zu kompensieren, werden Referenzstationsdaten in den Längenzusammenhang miteinbezogen. In der ersten Variante kommen Flächenkorrekturen zur Anwendung die in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurden. Die Berechnung der theoretischen Signalstärke an den drei Referenzstationen (RS1, RS2 und RS3) geschieht mit dem One-Slope-Modell, mit Hilfe der empirisch geschätzten Koeffizienten. Abbildung 4.15 zeigt den Längenzusammenhang, mit den verbesserten Signalstärken des Smartphone *Samsung Ace*.

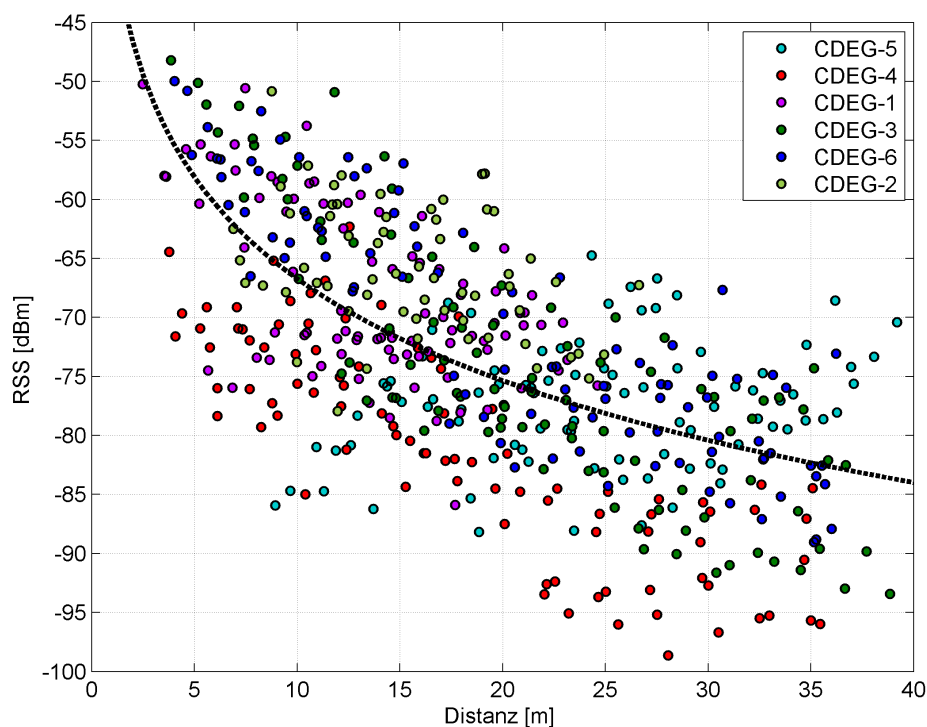


Abbildung 4.15: Längendiagramm der korrigierten Signalstärken, mit dem Smartphone *Samsung Ace*



Tabelle 4.8: Koeffizienten des One-Slope-Modells mit Referenzdaten und der multiple Korrelationskoeffizient

| Smartphone     | $P_0$   | $\gamma$ | $R$   |
|----------------|---------|----------|-------|
| Samsung Ace    | -38,068 | -2,8662  | 0,654 |
| Samsung Galaxy | -26,533 | -3,4121  | 0,655 |
| HTC Desire X   | -24,103 | -3,8904  | 0,756 |

In Tabelle 4.8 sind die geschätzten Koeffizienten aller drei Smartphones dargestellt. Im Vergleich zum One-Slope-Modell ohne Referenzstationsdaten, folgt ein geringerer Wert in  $P_0$ , was einem vertikalen Versatz der logarithmischen Funktion bedeutet. Der Dämpfungsfaktor  $\gamma$  weist einen höheren Betrag auf, was eine stärkere Distanzabhängigkeit in der geschätzten Funktion zur Folge hat. Die Wurzel aus dem Determinationskoeffizienten  $R^2$  zeigt bei allen drei Smartphone's eine geringe Verbesserung zum ersten Fall ohne Referenzstationen.

#### 4.5.4 Differenzieller Ansatz, 2. Methode

Die zweite Methode des differenziellen Ansatzes, beruht auf Differenzenbildung der Signalstärken zwischen Smartphone und Referenzstationen, siehe Kapitel 2.1.3. Um aus den subtrahierten Signalstärken einen Längenzusammenhang zu evaluieren, ist in Abbildung 4.16 die Signalstärkendifferenz den korrespondierenden Längendifferenzen gegenübergestellt. Prinzipiell ist die Signalstärke des Smartphones mit den drei Referenzstationssignalen einzeln subtrahiert, was eine Verdreifachung der Beobachtungsdaten liefert. Die MAC-Adressen sind mit unterschiedlichen Farben und die Referenzstationen mit unterschiedlichen Punktsymbolen gekennzeichnet.

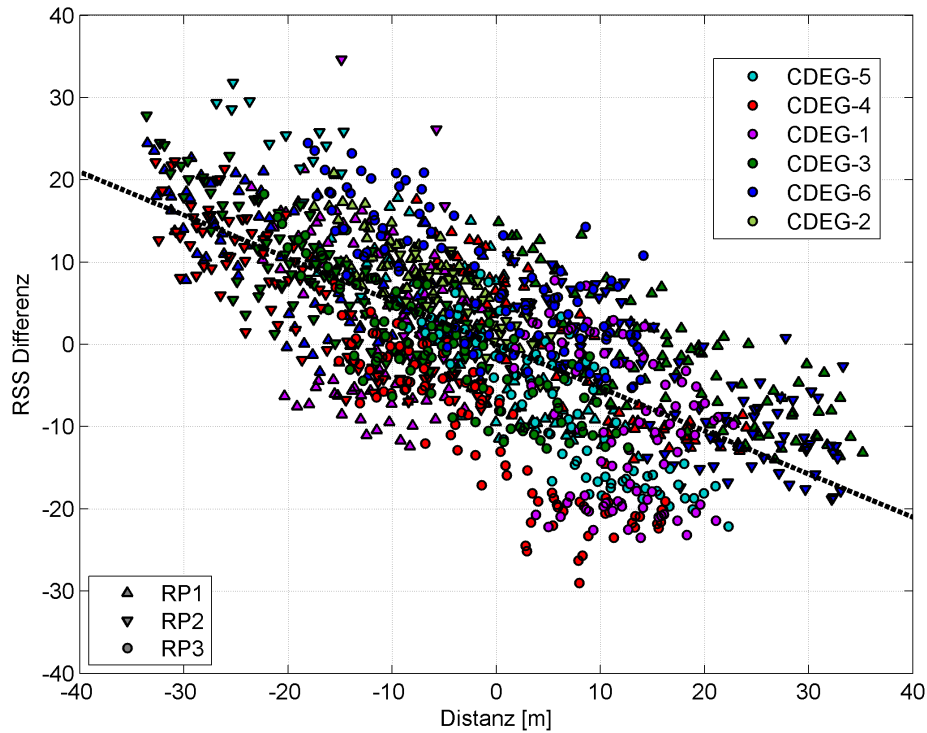


Abbildung 4.16: Längendiagramm der Signalstärkendifferenzen, mit dem Smartphone *Samsung Ace*

Grundsätzlich sind in Abbildung 4.16 große Variationen der Signalstärkendifferenzen zu den Längendifferenzen zu sehen. Ein inverser, linearer Zusammenhang ist erkennbar und eine Polynomannäherung 1. Grades, ist in Abbildung 4.16 als schwarz strichlierte Linie dargestellt. In Tabelle 4.9 sind die Koeffizienten der drei Smartphones, sowie die entsprechenden linearen Korrelationskoeffizienten  $r$  numerisch aufgelistet. Bei allen Smartphones ist die Steigung, bzw. der Korrelationskoeffizient sehr ähnlich.

Tabelle 4.9: Koeffizienten der Polynom-Approximation und der lineare Korrelationskoeffizient

| Smartphone     | $a_0$    | $a_1$    | $r$    |
|----------------|----------|----------|--------|
| Samsung Ace    | -0,03379 | -0,52476 | -0,703 |
| Samsung Galaxy | -2,20037 | -0,58008 | -0,740 |
| HTC Desire X   | -4,9992  | -0,57071 | -0,732 |

Das Histogramm der Längenabweichungen, der 1. Methode ist in Abbildung 4.17 links und das der 2. Methode rechts dargestellt. Bei der 1. Methode ist ähnlich wie im One-Slope-Modell ohne Referenzdaten, ein Problem der zu geringen Signalstärken zu erkennen, welche große Abweichungen in den abgeleiteten Distanzen liefern. Das Histogramm der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, zeigt eine Normalverteilung in den Längenabweichungen, dies kann man auf die lineare Modellfunktion zurückführen. Im Grunde genom-

men könnte man auch das One-Slope- bzw. das Multi-Wall-Modell mit einem linearen Polynom aufstellen, dieser Ansatz wird aber in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

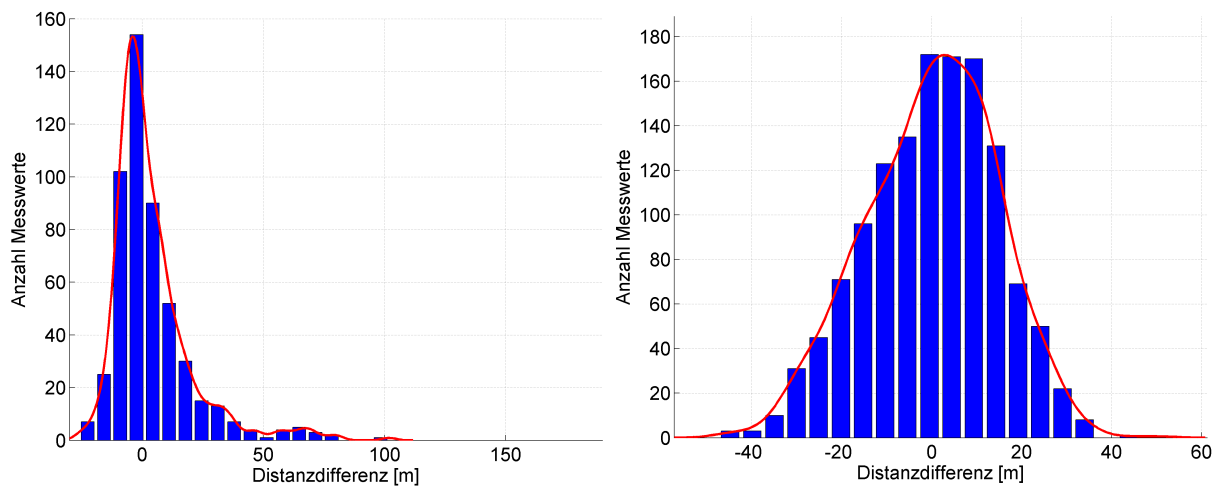


Abbildung 4.17: Histogramme der Längenabweichungen, 1. Methode (links) und 2. Methode (rechts)

### 4.5.5 Vergleich der einzelnen Modelle

Nachdem in jedem Ansatz die Parameter des Längenzusammenhangs empirisch bestimmt wurden, können die Abweichungen der Signalstärkenkonvertierungen zu den tatsächlichen Längen verglichen werden. Tabelle 4.10 zeigt die Mittelwerte und den Median der absoluten Abweichungen, sowie die dazugehörigen Standardabweichungen der Längeninvertierung.

Tabelle 4.10: Vergleich der einzelnen Signalstärkenkonvertierungen der drei Smartphones

| $\Delta L[m]$ | Samsung Ace |        |        | Samsung Galaxy |        |        | HTC Desire X |        |        |
|---------------|-------------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
|               | Mittel      | Median | $s_L$  | Mittel         | Median | $s_L$  | Mittel       | Median | $s_L$  |
| One-Slope     | 12.183      | 8.415  | 17.189 | 9.514          | 6.833  | 12.502 | 8.789        | 6.405  | 11.595 |
| Multi-Wall    | 16.895      | 8.357  | 28.387 | 9.104          | 5.328  | 14.911 | 7.436        | 5.148  | 10.332 |
| Diff.-A. 1.   | 10.770      | 6.908  | 16.645 | 10.251         | 6.482  | 15.419 | 7.295        | 5.017  | 10.508 |
| Diff.-A. 2.   | 11.733      | 10.340 | 14.568 | 10.282         | 8.796  | 12.925 | 10.675       | 9.254  | 13.269 |

In Tabelle 4.10 ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der absoluten Abweichungen, im unteren zweistelligen Meterbereich zu liegen kommen, wobei das Smartphone *HTC Desire X* die besten Ergebnisse liefert. Der Median ist in den ersten drei Methoden, zu den Mittelwerten wesentlich geringer, da hier einzelne große Abweichungen, wie sie bei diesen

Methoden vorkommen, den Median nicht beeinflussen.

Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten zeigen sich grundsätzlich keine wesentlichen Besserungen in den berechneten Distanzen, welche aus den WLAN-Signalstärken abgeleitet wurden. Das Smartphone *Samsung Ace* zeigt leichte Verbesserungen in den beiden differenziellen Ansätzen, hier konnten gegenüber dem One-Slope-Modell die mittleren Abweichungen um 1,41 m bzw. um 0,45 m und die Standardabweichung um 0,54 m bzw. 2,62 m gesenkt werden. Die beiden restlichen Handys *Samsung Galaxy* und *HTC Desire X* weisen aber im differenziellen Ansatz Verschlechterungen auf.

Die 2. Methode des differenziellen Ansatzes weist gegenüber der 1. Methode einen erhöhten Mittelwert und Median auf. Es muss aber berücksichtigt werden, dass sich die Anzahl der Beobachtungen verdreifacht hat, weswegen auch die Standardabweichungen, mit der Ausnahme von Smartphone *HTC Desire X*, in der 2. Methode eine Verbesserung aufzeigt.

### **Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurden die Räumlichkeiten vorgestellt, in denen die Indoor-Positionierung praktisch angewendet wird. In weiterer Folge wurden Voranalysen durchgeführt, um praktische Kenntnisse der WLAN-Signalstärkenausbreitung zu entwickeln.

Die Langzeitbeobachtungen mittels der Referenzstationen zeigen große Variationen in der Signalstärke einzelner AP. Im Vergleich der drei Referenzstationen konnte gezeigt werden, dass idente AP an unterschiedlichen Orten unterschiedliche Variationen zeigen, was die Positionierung mittels WLAN-Signalstärken problematisch gestaltet. Ebenfalls sind starke Signalstärkenvariationen im Experiment der Userorientierung aufgetreten, was eine klare Aussage der Dämpfung, welche durch den User verursacht wird, schwierig gestaltet.

Im Längenzusammenhang wurden die Koeffizienten des One-Slope- und des Multi-Wall-Modells empirisch geschätzt. Hierbei konnten große Diskrepanzen in den Längendiagrammen gezeigt werden, was auf den grundsätzlich hohen Rauschpegel der WLAN-Signalstärken zurückzuführen ist. Durch die Hinzunahme der Daten der Referenzstationen konnten in beiden differenziellen Ansätzen in den abgeleiteten Längen keine wesentlichen Verbesserungen aufgezeigt werden.

## 5 Positionierung

Das Kapitel Positionierung unterteilt sich in zwei größere Unterkapitel. Im ersten Teil wird auf die statische Bestimmung der Userposition eingegangen. Im nachfolgenden Teil auf die Bestimmung des Users, wenn sich dieser in Bewegung befindet. In diesem Kapitel wird der kleinste Quadrate-Ausgleich, in der statischen wie auch in der kinematischen Anwendung mit dem Smartphone *HTC Desire X* betrachtet. Die Vergleiche der unterschiedlichen Smartphones, die Ausgleichungsart der Beobachtungen (Least-Median-Square und kleinster Quadrate-Ausgleich), sowie die Auswirkung auf die Wahl des Standortes der Referenzstation, befinden sich im Kapitel 6.

### 5.1 Statische Positionsbestimmung

Die statische Positionsbestimmung findet mit Hilfe der Scans an den 93 Rasterpunkten statt, die in Kapitel 4.1 beschrieben wurden. In einem erneuten Scandurchgang wurden an jedem Rasterpunkt in 4 Userausrichtungen in einem Intervall  $90^\circ$  und pro Ausrichtung des Users 5 Scans durchgeführt. Über die 5 Scans wurde der Mittelwert gebildet und zu jeder Userausrichtung wurde eine separate Positionsbestimmung berechnet. In Abbildung 5.1 ist die Standardabweichung der ersten 15 Rasterpunkte über die Mittelung der 5 Scans dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Standardabweichungen grundsätzlich sehr gering sind und im Durchschnitt bei 1,5 dBm liegen. Bei einzelnen Scans und AP ist eine erhöhte Standardabweichung erkennbar, jedoch zeigen die Signalstärken der einzelnen AP bei allen Rasterpunkten über die Mittelung der 5 Scans die gleiche Größenordnung der Standardabweichung.

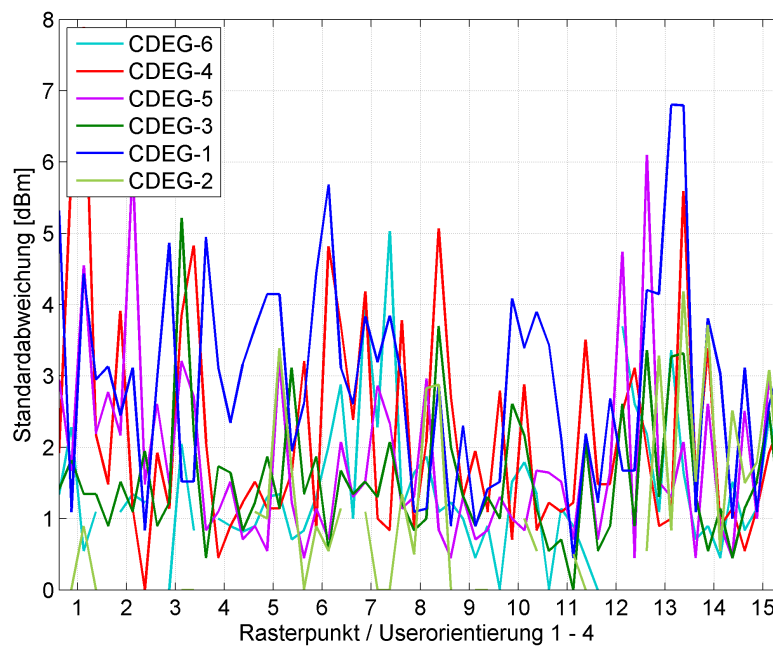


Abbildung 5.1: Standardabweichung aus der Mittelbildung der 5 Scans pro Rasterpunkt und Userorientierung

Durch die Varianzfortpflanzung bedeutet eine Standardabweichung von 1,5 dBm eine Unsicherheit von 1,2 m in der abgeleiteten Länge, bei einer resultierenden Entfernung von 7 m. Durch die flach auslaufende Distanzfunktion wächst der theoretische Längenfehler bei schwachen Signalstärken sehr stark an. Tabelle 5.1 zeigt einige Standardabweichungen in den berechneten Längen, bei einer Unsicherheit 1,5, 3,0 und 6,0 dBm in der Signalstärke, bei einer resultierenden Entfernung von 7 bzw. 30 m. Die Koeffizienten der logarithmischen Distanzfunktion wurden vom One-Slope-Modell des Smartphones *HTC Desire X* entnommen.

Tabelle 5.1: Standardabweichung in der Signalstärkeninvertierung

| $s_{RSS}$                       | $\pm 1,5 \text{ dBm}$ | $\pm 3 \text{ dBm}$  | $\pm 6 \text{ dBm}$  |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| $s_L \text{ bei } 7 \text{ m}$  | $\pm 0,8 \text{ m}$   | $\pm 1,6 \text{ m}$  | $\pm 3,3 \text{ m}$  |
| $s_L \text{ bei } 30 \text{ m}$ | $\pm 5,5 \text{ m}$   | $\pm 11,0 \text{ m}$ | $\pm 22,6 \text{ m}$ |

### 5.1.1 Signalstärkeninvertierung

Im ersten Schritt werden die gescannten Signalstärken mit Hilfe der beiden Ausbreitungsmodelle (One-Slope- und Multi-Wall-Modell), sowie den beiden differenziellen Ansätzen zu Längenbeobachtungen zwischen User und AP's invertiert, um anschließend die Position

des Users in einem kleinsten Quadrate-Ausgleich zu bestimmen.

Abbildung 5.2 zeigt die Abweichungen der berechneten Längen zu den tatsächlichen Distanzen, welche aus den Koordinaten bestimmt wurden, in allen vier Userorientierungen der gesamten Rasterpunkte. Zur Invertierung kommen die in Kapitel 4.5.1 empirisch bestimmten Koeffizienten zur Anwendung. Die Längenabweichungen der verschiedenen AP wurden in der Graphik durch unterschiedliche Farben signalisiert. Zur Übersicht wurden die Vektoren in den Abbildungen der einzelnen Varianten mit einem Faktor von 0.1 skaliert. Einerseits zeigt der Vektor in Richtung des jeweiligen AP, wenn die berechnete Länge zwischen User und AP zu kurz ist, andererseits ist der Vektor zur Gegenseite gerichtet.

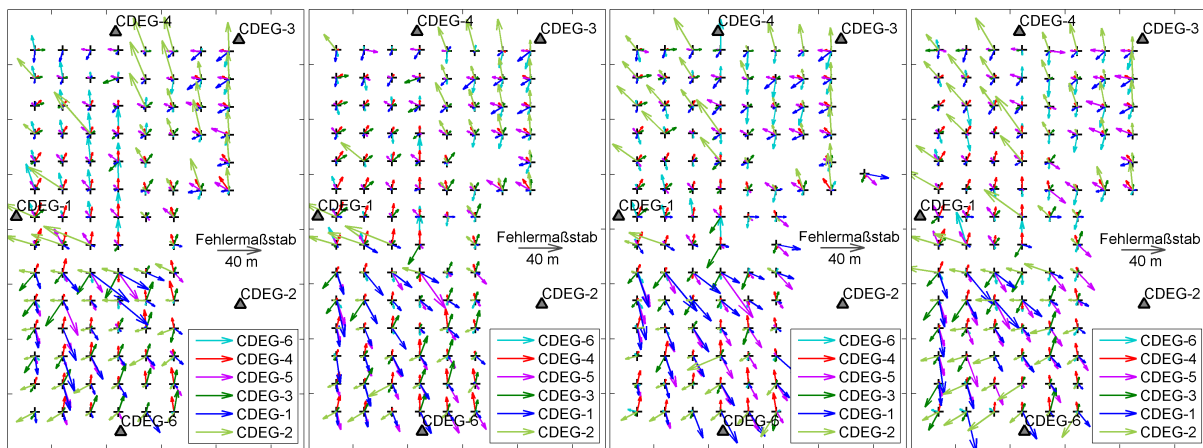


Abbildung 5.2: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit dem One-Slope-Modell, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

Im Vergleich der einzelnen Detailausschnitte sind differente Längenabweichungen erkennbar, jedoch ist kein systematischer Einfluss der Ausrichtung des Users sichtbar. Im unteren Bereich der Rasterpunkte, welcher sich im Foyer des TU-Gebäudes befindet, siehe Abbildung 4.3, sind die größten Längenabweichungen bis max. 50 m bei allen vier Ausrichtungen des Benutzers erkennbar. Hier bieten einige Säulen, wie auch der Stiegenaufgang der Zwischenebene, eine wesentliche Dämpfung der WLAN-Signale, weshalb viele invertierte Distanzen zu lang berechnet werden. Im oberen Bereich, welcher sich im Hörsaal VII und Computerbereich befindet, sind die Längenabweichungen, mit der Ausnahme des AP *CDEG-2* wesentlich geringer und die mittleren Abweichungen befinden sich in einer Größenordnung von 8,6 m, siehe Abbildung 5.2.

In der folgenden Darstellung 5.3 ist die Längeninvertierung mit dem Multi-Wall-Modell durchgeführt. Wie unter 2.2.3.2 beschrieben wird hier eine Klassifikation durchgeführt, welche Wände die Signalstärken durchschreiten, um anschließend die Effekte zu berücksichtigen. Für die Klassifizierung der einzelnen Signale wird die bekannte Position des

jeweiligen Rasterpunktes verwendet. Die Dämpfungswerte der drei Wände, wie auch die Koeffizienten der logarithmischen Längenfunktion, wurden aus dem letzten Kapitel 4.5.2 übernommen. In Abbildung 5.3 sind die drei Wände als graue Linien dargestellt.

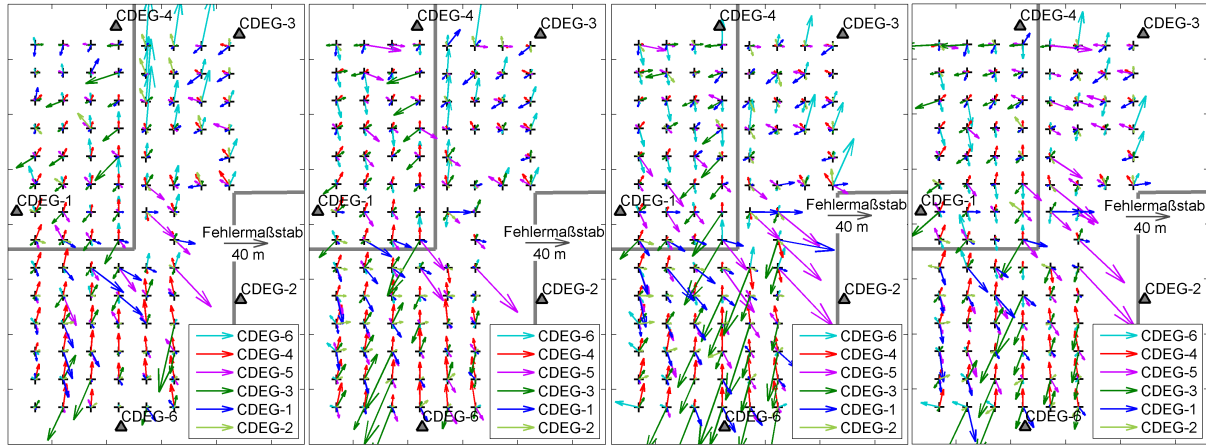


Abbildung 5.3: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit dem Multi-Wall-Modell, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

Im Vergleich zum One-Slope-Modell kann ein Anstieg der markanten Längenabweichungen festgestellt werden, die Anzahl der Längendifferenzen über 30 m ist somit um 40 % gestiegen. Wie bereits in 4.5.2 beschrieben, kommt es durch die flach auslaufende logarithmische Funktion bei zu schwachen Signalstärken zu extremen Längenabweichungen, die sich bis zu einer Differenz von 95 m belaufen. Im unteren Bereich kann anhand des Signals von AP *CDEG-3* (dunkelgrüne Vektoren), der Einfluss der Signalklassifizierung gut beobachtet werden. Ein Teil der Rasterpunkte befindet sich im LOS-Bereich des AP *CDEG-3* (rechts unten), hier sind große Abweichungen erkennbar, wobei die Distanz zu lang berechnet wurde. Der angrenzende Teil (links unten) befindet sich im NLOS-Bereich des AP *CDEG-3*, hier ist die Signalstärke mit dem Dämpfungseffekt von zwei Wänden (Wand zwischen Hörsaal VII und Foyer und Wand zwischen Hörsaal VII und Computerbereich) im Modellansatz verstärkt und die berechneten Längen erweisen sich in einigen Fällen als etwas zu kurz.

Abbildung 5.4 zeigt die Längenabweichungen des differenziellen Ansatzes der 1. Methode, die in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde. Die Referenzstationen befinden sich direkt unter den AP (*CDEG-1*, *CDEG-3* und *CDEG-6*) und wurden in den Darstellungen mit Quadraten symbolisiert. Bei der Berechnung der Flächenparameter, die für die Interpolation der Korrekturwerte benötigt werden, zeigte sich ein weiteres Problem, da die Referenzstationen nicht alle Signalstärken von jedem Access Point aufzeichnen. Einzelne Signale sind am Referenzpunkt zu schwach und daher können die Flächenparameter nicht bestimmt



werden. Beispielsweise siehe in Abbildung 4.4 ist AP *CDEG-2* nicht in der Zeitreihe vorhanden. Da diese Signale jedoch vom User registriert werden und auch zur Trilateration verwendet werden sollten, ist eine Pseudo-Signalstärke von -95 dBm bei zu schwachen Signalstärken angenommen, die nicht an der Referenzstation registriert wurden. Die verwendeten drei Smartphone's registrieren WLAN-Signale bis zu einer Signalstärke von -95 dBm. Zur Interpolation der Korrekturwerte wird die bekannte Position der Rasterpunkte herangezogen.

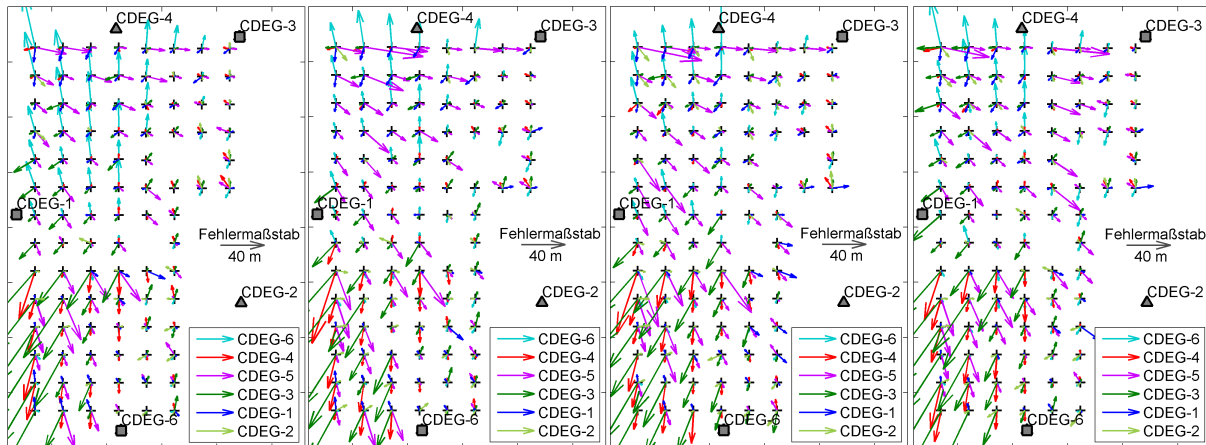


Abbildung 5.4: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

In der 1. Methode des differentiellen Ansatzes ist im zentralen Bereich der drei Referenzstationen eine deutliche Verbesserung zu dem One-Slope-Modell ohne Referenzdaten erkennbar. Vor allem die abgeleiteten Längen des AP *CDEG-1* (an diesem AP befindet sich eine Referenzstation) zeigen gute Ergebnisse in den abgeleiteten Längen, durch die Verwendung von Korrekturdaten. Die größte Abweichung dieses AP's befindet sich in einer Größenordnung von 24,7 m. Die größten Längenabweichungen (100 m) zeigen sich in der Signalstärke von AP *CDEG-3* und *CDEG-4* im linken unteren Bereich. Des Weiteren können zu diesen beiden AP's im Längendiagramm, in Abbildung A.16 sehr geringe, korrigierte Signalstärken festgestellt werden, was wie bereits erwähnt, eine große Abweichung in der Länge durch die flach auslaufende logarithmische Distanzfunktion mit sich bringt. Ebenso ist in Abbildung 5.4 zu erkennen, dass die Längendiskrepanz zum äußeren Bereich des Rasters sehr stark zunimmt und in der Mitte der Referenzstationen geringere Abweichungen auftreten.

Die Längenberechnung der 2. Methode des differentiellen Ansatzes zeigt keine markant großen Abweichungen zu den tatsächlichen Distanzen zwischen Smartphone-User und AP. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, wurde die Differenzenbildung der Signalstärken zu den

drei Referenzstation durchgeführt, die sich ebenso wie bei der 1. Methode an denselben AP befinden. Abbildung 5.5 zeigt an jedem Rasterpunkt die gemittelte Längenabweichung über die Differenzenbildungen der drei Referenzstationen der vier Userorientierungen.

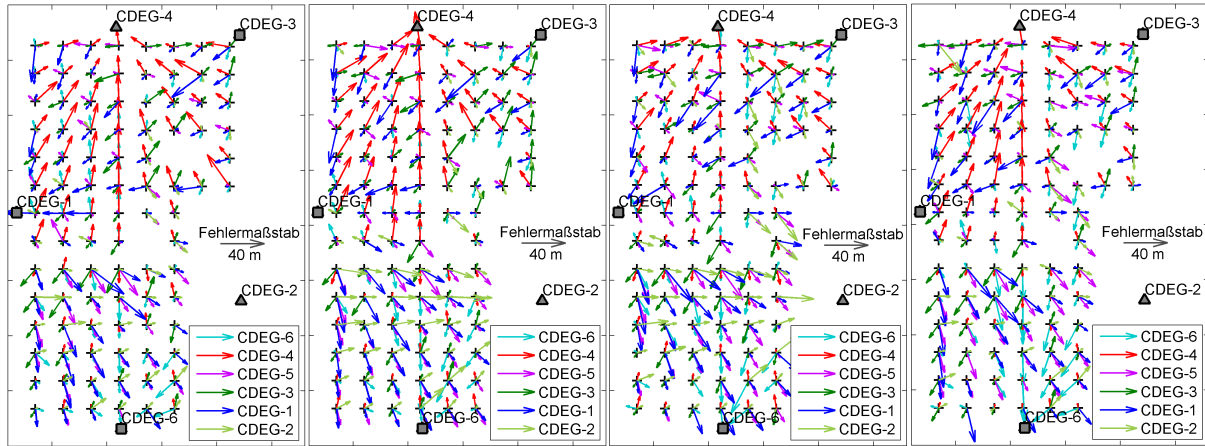


Abbildung 5.5: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

Bei der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, kann eine räumliche, homogene Verteilung der Längenabweichungen beobachtet werden, wobei im linken oberen Bereich (Hörsaal) größere Diskrepanzen zu erkennen sind. Im Mittel betragen die Längenabweichungen 10,5 m und die maximale Abweichung befinden sich in einer Größenordnung von 39 m. Wie bereits im One-Slope-Modell erwähnt, kann man grundsätzlich bei jeder dargestellten Methode der Signalstärkeninvertierung geringe Unterschiede in den einzelnen Ausrichtungen des Users feststellen, es sind aber keine systematischen Einflusseffekte der Usersausrichtung erkennbar.

### 5.1.2 Positionsberechnung

Im nächsten Schritt wird die Userposition aus den abgeleiteten Längen in einem kleinsten Quadrate-Ausgleich bestimmt. Da diese Methode eine Normalverteilung der Beobachtungsdaten voraussetzt und die Histogramme der Längenabweichungen bereits einige markante Abweichungen zeigen, siehe Abbildung A.15, sollte eine Ausreißerdetektion vorab markante Längendifferenzen ausschließen.

In der praktischen Umsetzung zeigt sich das automatische Auffinden dieser markanten Längenabweichungen jedoch als eine Herausforderung. Da einerseits in der Realität die Position des Users vorab nicht bekannt ist, somit auch die wahre Länge zum jeweiligen AP und andererseits führt ein mehrfaches Scannen nicht zum Erfolg, da systematische

Fehlereinflüsse das Signal beeinflussen. Aus diesem Grund wird eine Variante der dänischen Methode eingesetzt, um in einem iterativen Prozess die Gewichtung als Funktion der Verbesserungen zu verwenden, siehe Kapitel 2.1.2.

In der praktischen Anwendung zeigte sich in der Gewichtsfunktion (Formel 7) nicht den Gewichtseinheitsfehler, sondern die Standardabweichungen zu verwenden, welche in Tabelle 5.2 numerisch abgebildet ist. Da sich bereits im Längenzusammenhang einzelne markante Abweichungen zeigten, siehe Abbildung 4.14, wurde 5 % der größten Abweichungen vorab eliminiert. Somit liegt diese Standardabweichung deutlich unter der Standardabweichung die in Tabelle 4.10 mit den gesamten Daten berechnet wurde. Die verwendete Standardabweichung des 95 % Datenbereiches, liegt auch deutlich unter dem Gewichtseinheitsfehler, dies bewirkt eine empfindlichere Gewichtsfunktion, sodass Beobachtungen in einem höherem Maß niedriger gewichtet werden.

Tabelle 5.2: Standardabweichung der Längenberechnung des 95 % Datenbereiches

| $s_L[m]$                | <i>Samsung Ace</i> | <i>Samsung Galaxy</i> | <i>HTC Desire X</i> |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| One-Slope-Modell        | 12.68              | 10.29                 | 9.56                |
| Multi-Wall-Modell       | 17.60              | 9.17                  | 8.01                |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 10.87              | 10.80                 | 7.78                |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 13.28              | 11.54                 | 12.25               |

Tabelle 5.3 zeigt die Häufigkeit der unterschiedlichen Gewichtungen, der vier Varianten der Signalstärkeninvertierung. In Abbildung 5.6 wird die Gewichtung der Beobachtungen, jeweils in der 1. Userorientierung in einer farblichen Klassifizierung dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass in den ersten drei Varianten einige Beobachtungen niedrig gewichtet werden (rote Vektoren) und somit keinen großen Einfluss auf die berechnete Position haben. In der 2. Methode des differentiellen Ansatzes zeigen sich keine wesentlichen unterschiedlichen Gewichtungen, da einerseits die abgeleiteten Längen eine Normalverteilung aufweisen, siehe Abbildung 4.17 rechts und andererseits mehrere Längenbeobachtungen eines Rasterpunktes eine markante Abweichung aufweisen. Aus diesem Grund wird in der 2. Methode von einer Gewichtung der Beobachtungen abgesehen.

Tabelle 5.3: Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen

|                         | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
|-------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| One-Slope-Modell        | 13        | 41              | 217             | 1762      |
| Multi-Wall-Modell       | 58        | 52              | 202             | 1682      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 56        | 35              | 180             | 1494      |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 1               | 19              | 1911      |

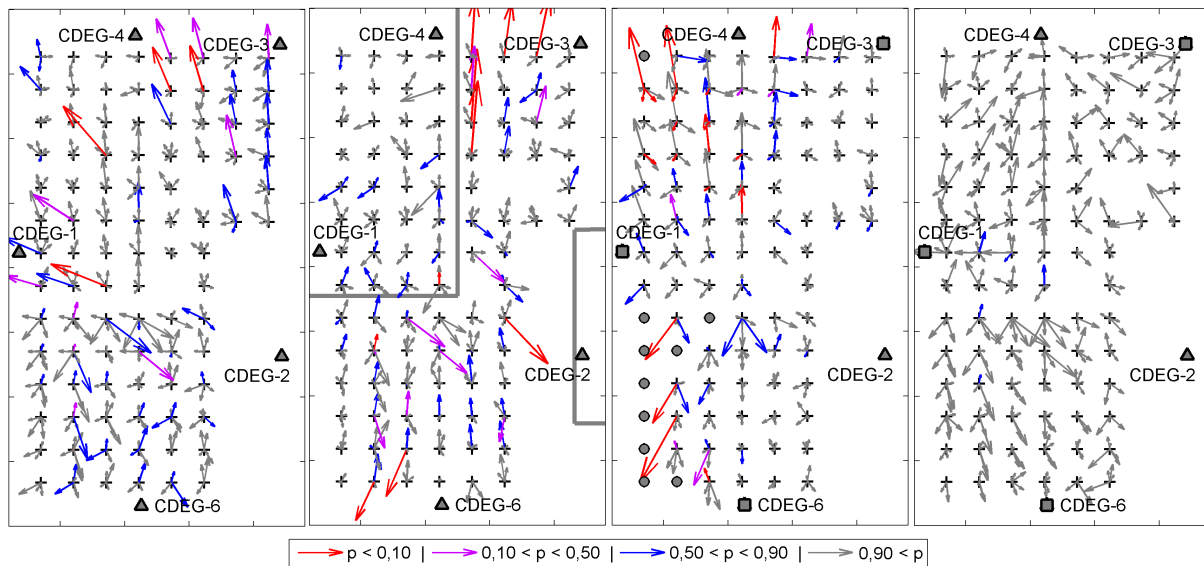


Abbildung 5.6: Gewichte  $p$  der Beobachtungen jeweils in der 1. Userorientierung, von links nach rechts: One-Slope-Modell, Multi-Wall-Modell, 1. Methode -, 2. Methode des differenziellen Ansatzes

Da an einigen Rasterpunkten der kleinste Quadrate-Ausgleich nicht konvergiert, kann die Position nicht bestimmt werden. In der Darstellung 5.6 wurden die nicht bestimmten Rasterpunkte als graue Kreise symbolisiert. Hier konnte auch keine Gewichtung der Beobachtung vorgenommen werden. Tabelle 5.4 zeigt die Anzahl der bestimmten Positionen in einer räumlichen Separation, da sich in der Positionsbestimmung ein räumlicher Unterschied abzeichnete. Hierbei ist ersichtlich, dass in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes, im Foyer einige Positionen nicht bestimmt wurden. Das One-Slope-Modell zeigt insgesamt die am meisten bestimmten Positionen, wobei es im unteren Rasterbereich (Foyer) zu vermehrten Unbestimmbarkeiten der Userposition kommt.

Tabelle 5.4: Anzahl der bestimmten Positionen

|                         | Gesamt | Computerb. | Foyer | Hörsaal |
|-------------------------|--------|------------|-------|---------|
| Gesamtanzahl            | 372    | 100        | 144   | 128     |
| One-Slope-Modell        | 372    | 100        | 144   | 128     |
| Multi-Wall-Modell       | 367    | 100        | 139   | 128     |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 330    | 100        | 104   | 126     |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 372    | 100        | 144   | 128     |

Abbildung 5.7 zeigt die Positionierungsfehler als Vektoren der vier Varianten der Längeninvertierung. Als Maßstabsinformation dienen Isolinien, die den mittleren Positionsfehler der vier Orientierungen widerspiegeln, da die Fehlervektoren zur Übersichtlichkeit

mit einem Faktor von 0,1 skaliert wurden. Die grauen Kreise am Rasterpunkt symbolisieren, dass dieser nicht bestimmt werden konnte, wobei die Größe des Kreises die Häufigkeit widerspiegelt. Maximal können alle 4 Userorientierungen an einem Rasterpunkt nicht bestimmt werden.

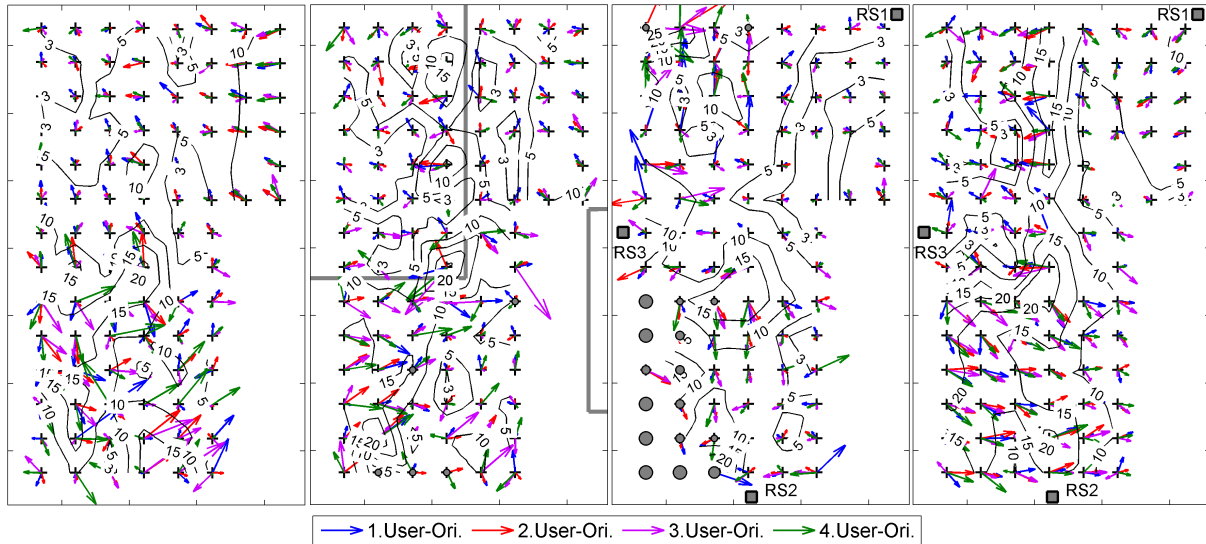


Abbildung 5.7: Positionsabweichungen von links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode -, 2. Methode des differentiellen Ansatzes

Im ersten Fall der Signalstärkeninvertierung (One-Slope-Modell) sind beträchtliche Abweichungen in der Positionsbestimmung im unteren Rasterbereich erkennbar. Wie bereits bei den Längenabweichungen beschrieben, treten im Foyer durch physikalische Objekte Dämpfungseffekte auf, die einen signifikanten Einfluss auf die WLAN-Signale und somit auch auf die Positionierung mittels der Trilateration haben. Bei einigen Rasterpunkten im Hörsaal können hier gute Ergebnisse, mit einer Abweichung von 3 m, erzielt werden. Im Multi-Wall-Modell zeigen sich geringfügige Verbesserungen zur ersten Variante, es sind aber im Foyer 5 Positionen nicht bestimmt worden, siehe Tabelle 5.4.

Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten ist in der statischen Positionierung in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes eine geringe Verbesserung von 7,5 % und in der 2. Methode eine geringe Verschlechterung von 9,6 % über die gesamte Rasterfläche erkennbar. In der 1. Methode zeigen sich im zentralen Bereich der drei Referenzstationen gute Ergebnisse. Dies kann durch die Interpolation der Korrekturwerte begründet werden, da mit zunehmendem Abstand der drei Referenzstationen eine Extrapolation stattfindet. Die 2. Methode des differentiellen Ansatzes zeigt, dargestellt in der Abbildung 5.7 rechts, im oberen rechten Rasterbereich (Computerbereich) ähnlich gute Ergebnisse wie bei der 1. Methode, wobei aber im restlichen Bereich die Positionsabweichungen gegenüber der One-Slope-Modell ohne Referenzstationen angestiegen sind. Da bei der 2. Methode

des differentiellen Ansatzes eine einfache Mittelbildung über die drei Referenzstationen durchgeführt wird, zeigt Abbildung 5.8 die Ergebnisse der Positionierung, der einzelnen Signalstärkendifferenzen, der drei Referenzstationen.

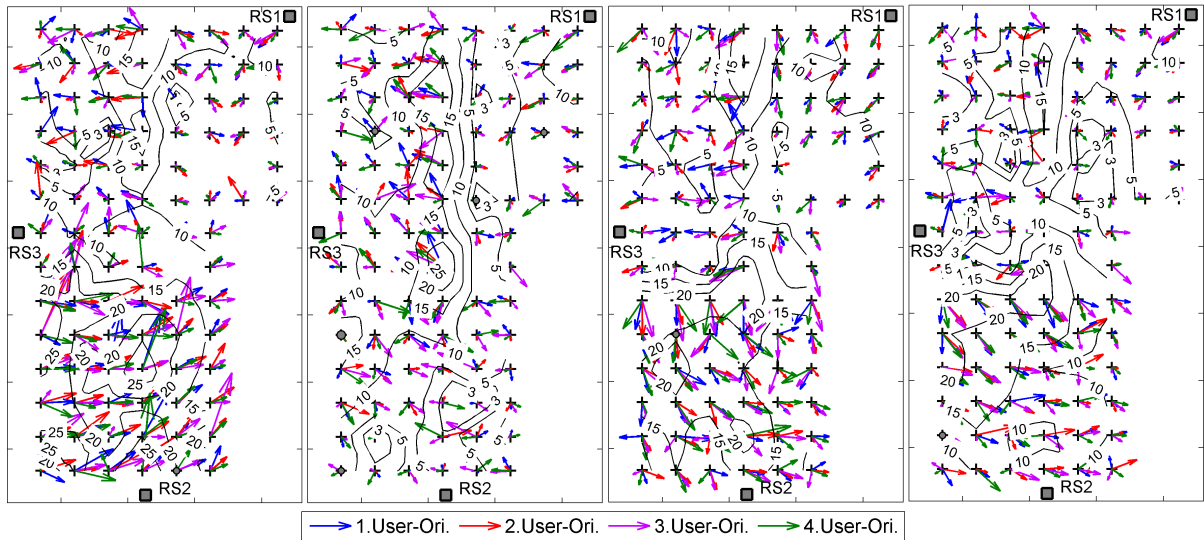


Abbildung 5.8: Positionsabweichungen der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Differenzenbildung mit RS1, - RS2, - RS3, Differenzenbildung mit einer inversen Distanzgewichtung

In der oberen Darstellung der einzelnen Differenzenbildungen ist zu erkennen, dass die Positionsbestimmung in der Nähe der jeweiligen Referenzstation gute Ergebnisse liefert. In Abbildung 5.8 rechts, ist eine inverse Gewichtung zum Abstand der jeweiligen Referenzstation durchgeführt. Für die Gewichtung bzw. die Distanzermittlung zwischen User und Referenzstation werden die bekannten Rasterkoordinaten verwendet. Hierbei sind die Positionsabweichungen gegenüber einer einfachen Mittelbildung um 2,3 % leicht gesunken. Durch die minimale Verbesserung der inversen Distanzgewichtung und den entsprechenden Rechenaufwand wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

Die vier Darstellungen in 5.9 zeigen die Abweichungen der Positionierung der 4 Längeninvertierungsvarianten (One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differentiellen Ansatzes). Darüber hinaus wurden die 95 % Konfidenzellipsen, welche aus der Kovarianzmatrix aller Positionsabweichungen abgeleitet wurden, dargestellt.

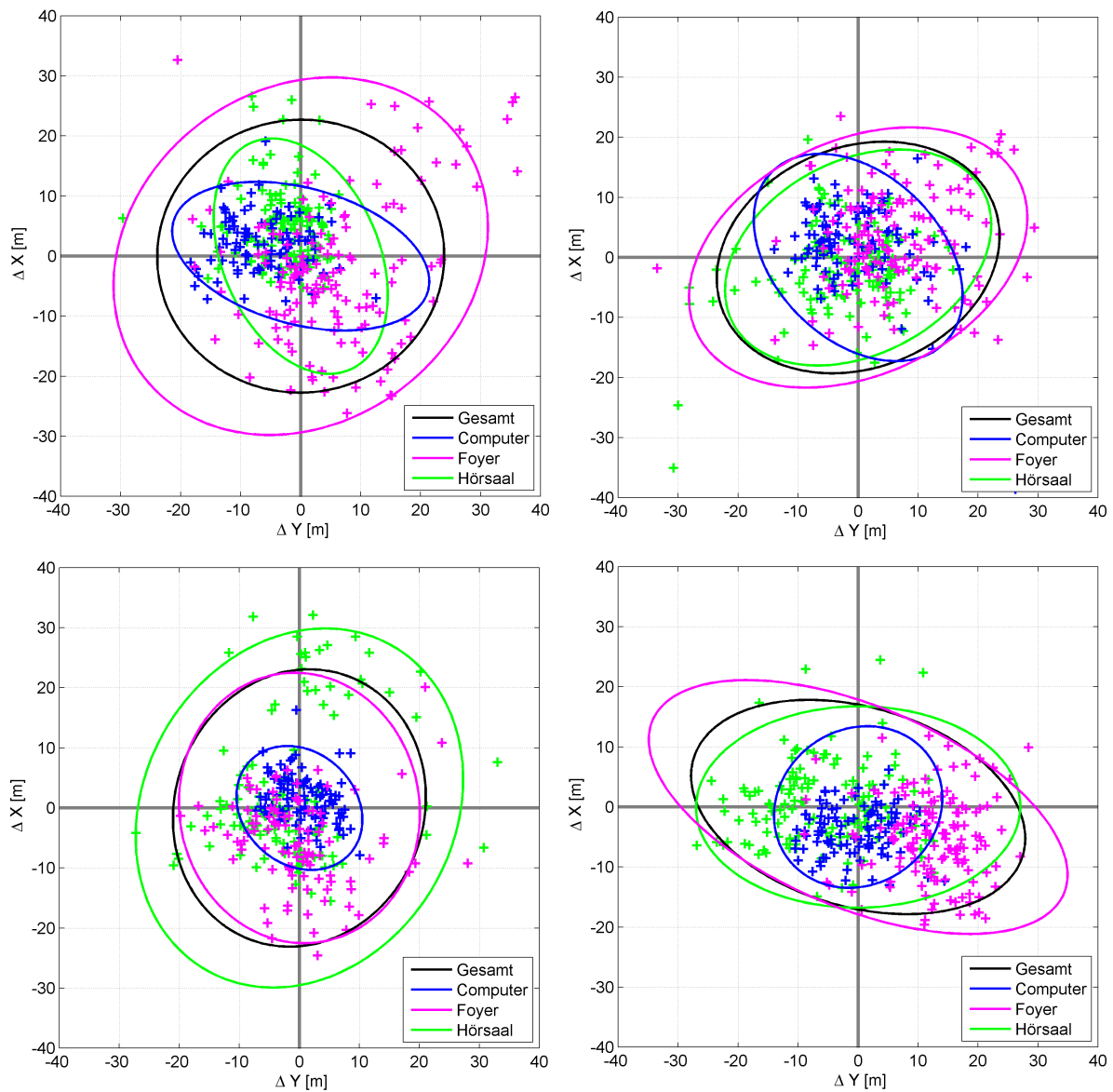


Abbildung 5.9: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode - , rechts unten: 2. Methode des differenziellen Ansatzes

In Tabelle 5.5 ist der mittlere Positionsfehler und der Helmertsche Punktlagefehler  $s_{HP}$ , welcher mit der pythagoräischen Summe der beiden Standardabweichungen der Koordinaten gebildet wird, numerisch aufgelistet.

Tabelle 5.5: Mittlere Positionsabweichung und der Helmertsche Punktlagefehler in der statischen Positionierung

| $\Delta Position[m]$ | Gesamt |          | Computerb. |          | Foyer  |          | Hörsaal |          |
|----------------------|--------|----------|------------|----------|--------|----------|---------|----------|
|                      | Mittel | $s_{HP}$ | Mittel     | $s_{HP}$ | Mittel | $s_{HP}$ | Mittel  | $s_{HP}$ |
| One-Slope            | 10,90  | 13,47    | 9,00       | 10,11    | 14,61  | 17,60    | 8,21    | 9,96     |
| Multi-Wall           | 10,23  | 12,43    | 8,44       | 10,01    | 12,31  | 14,52    | 9,36    | 11,66    |
| Diff.-A. 1.          | 10,08  | 12,77    | 5,40       | 6,02     | 10,60  | 12,32    | 13,36   | 16,53    |
| Diff.-A. 2.          | 11,95  | 13,51    | 7,24       | 7,94     | 15,64  | 16,66    | 11,48   | 12,99    |

Von der räumlichen Separation ist in Abbildung 5.9 klar ersichtlich, dass im Computerbereich bei allen Methoden die besten Ergebnisse erzielt wurden. Bei der statischen Positionierung ohne Referenzstationen liegen die mittleren Positionsfehler bei ca. 11 m, bei guten räumlichen Bedingungen senken sich diese auf 8-9 m. Das One-Slope-Modell zeigt im Foyer einen markante Anstieg der Positionsabweichungen, da wie bereits erwähnt physikalische Einflussfaktoren das WLAN-Signal signifikant beeinflussen. Die 1. Methode des differenziellen Ansatzes liefert im Foyer die geringsten Abweichungen in der Positionierung. Das Multi-Wall-Modell zeigt im Ergebnis der Positionierung, gegenüber dem One-Slope-Modell, eine geringe Verbesserung, mit der Ausnahme des Hörsaals. Hier haben sich die mittlere Positionsabweichungen um 1,15 m vergrößert, konnten aber im Foyer um 2,3 m gesenkt werden.

Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten können in der 1. Methode der differenziellen Trilateration die mittlere Positionsabweichung um 0,8 m und der Helmertsche Punktlagefehler um 0,7 m verbessert werden. Die 2. Methode zeigt in Summe keine wesentlichen Verbesserungen in der Positionierung, mit der Ausnahme des Computerbereichs, hier konnten die mittleren Positionsabweichungen um 1,8 m gesenkt werden. In den Abbildungen 5.7 und 5.9 ist ebenfalls erkennbar, dass in den beiden differenziellen Methoden im Computerbereich die besten Positionierungsergebnisse erzielt wurden.

Die Darstellung der 95 % Konfidenzellipsen liefert ein ernüchterndes Resultat in der Positionierung mittels der Signalstärkentrilateration. Es konnte in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes die große Halbachse von 24 m, auf 23,4 m minimal verkleinert werden. Zwar zeigen die großen Halbachsen bei guten räumlichen Bedingungen des differenziellen Ansatzes eine Größenordnung von 11 m, jedoch ist die Tatsache, dass sich der User mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in Abstand von 11 m zur wahren Position befindet, für viele Navigationsanwendungen nicht zufriedenstellend.



## 5.2 Kinematische Positionsbestimmung

In der kinematischen Positionierung wird die Bestimmung der Position des Users durchgeführt, währenddessen sich dieser in Bewegung befindet. In der praktischen Umsetzung bewegte sich der Smartphonebenutzer im durchschnittlichen Schrittempo entlang der vordefinierten Trajektorie, die im Übersichtplan dargestellt ist, siehe Abbildung 4.3.

In weitere Folge zeigten sich auch sehr gravierende Unterschiede der einzelnen Smartphones. In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse des Smartphones *HTC Desire X* präsentiert, da dieses Gerät die besten Ergebnisse in der kinematischen Anwendung aufzeigte. Die Vergleiche der einzelnen Smartphones sind in Kapitel 6.3 zu finden.

### 5.2.1 Signalstärkeninvertierung

Im Gegensatz zur statischen Positionsbestimmung kommt in der kinematischen Anwendung keine Mittelung der Signalstärkenscans zum Einsatz und jeder einzelne Scan wird in einem separaten Verfahren verwendet um die Userposition zu bestimmen. Im ersten Schritt wurden wie im statischen Fall, die aus dem Kapitel 4.5 empirisch bestimmten Koeffizienten übernommen, um eine Invertierung der gescannten Signalstärken in Längen zu den einzelnen AP durchzuführen.

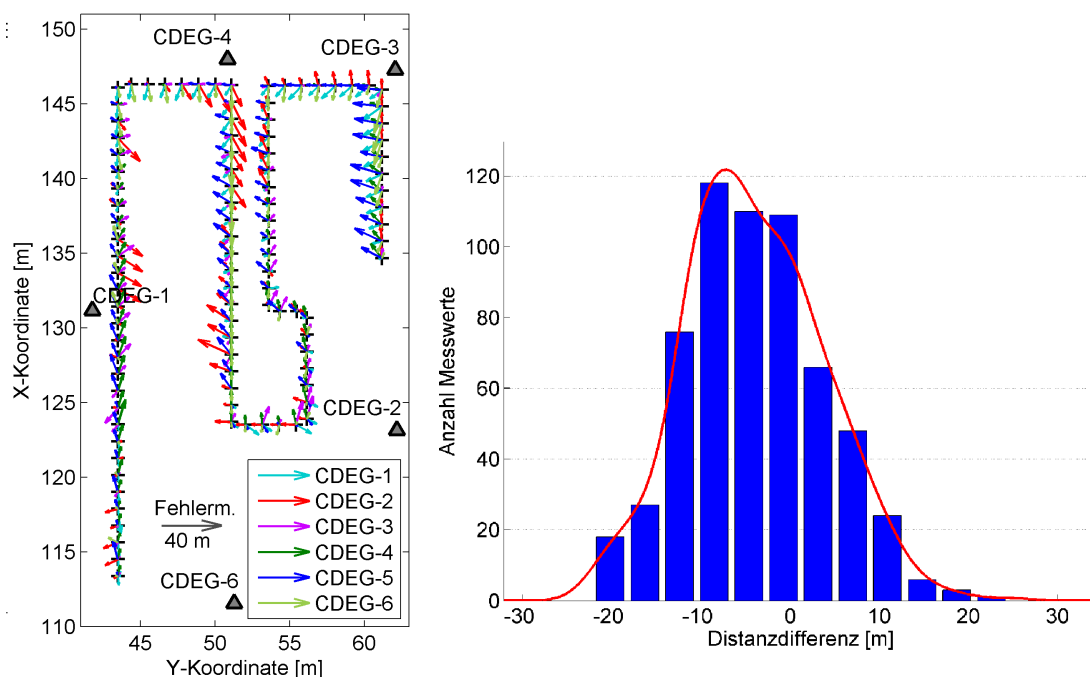


Abbildung 5.10: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit dem One-Slope-Modells, links: Vektorplot, rechts: Histogramm

Abbildung 5.10 links zeigt die Längenabweichungen der invertierten Signalstärken als Vektorplot, welche mit dem WiFi-Recorder entlang der definierten Trajektorie gescannt wurden. Wie in den statischen Darstellungen, wurden die Fehlervektoren mit einem Faktor von 0,1 skaliert. In der rechten Darstellung ist das dazugehörige Histogramm der Längenabweichungen dargestellt. Im Vergleich zum statischen Fall sind die größten Längendifferenzen im One-Slope-Modell wesentlich geringer und liegen in einem Bereich von 25 m. Im Histogramm ist auch ein Versatz des Maximums sichtbar und es treten keine einzelnen markanten Abweichungen auf, wie es im statischen Scan der Fall war, siehe Abbildung A.15.

In Abbildung 5.11 sind die Längenabweichungen, sowie das dazugehörige Histogramm, des Multi-Wall-Modells dargestellt. Die Wände sind als dicke graue Linien symbolisiert und die drei Dämpfungswerte wurden aus den statischen Messungen der Längenzusammenhangs übernommen, siehe Tabelle 4.7.

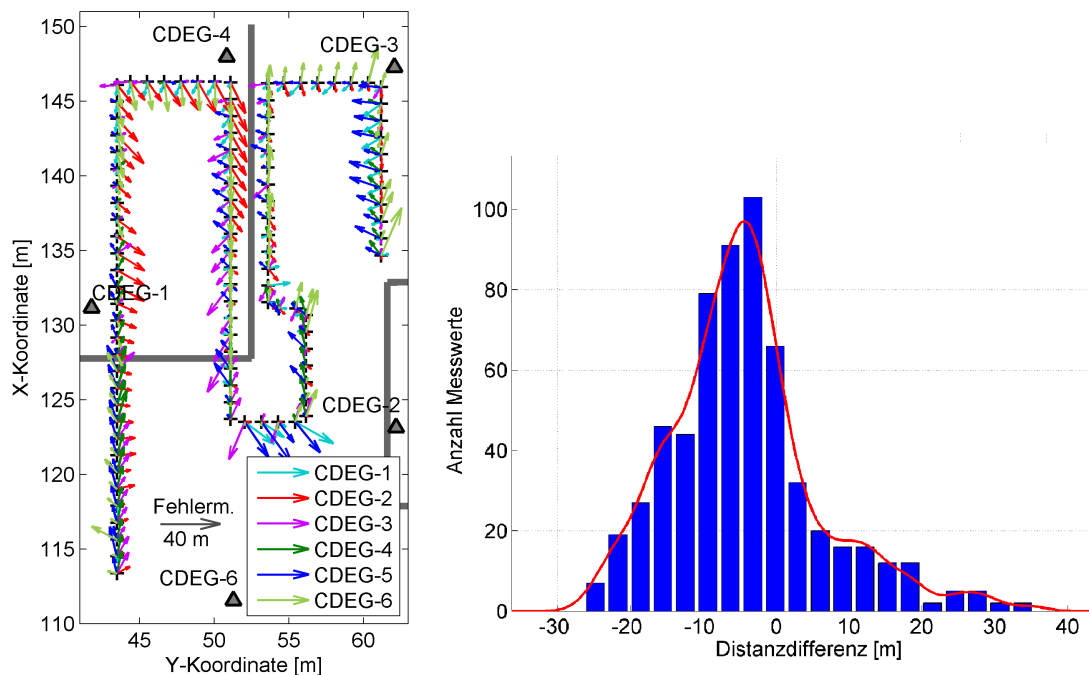


Abbildung 5.11: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit dem Multi-Wall-Modells, links: Vektorplot, rechts: Histogramm

Im Vergleich zum One-Slope-Modell ist erkennbar, dass das Maximum im Histogramm auch einen Versatz aufweist, wobei die absolute Häufigkeit gestiegen ist. Es sind aber auch größere Abweichungen hinzugekommen, die sich bei 35 m befinden.

In Abbildung 5.12 ist der Vektorplot, sowie das dazugehörige Histogramm der Längen-

abweichungen, der 1. Methode des differentiellen Ansatzes dargestellt. Zur Interpolation der Korrekturwerte wurde die Sollposition der definierten Trajektorie verwendet. Die drei Referenzstationen befinden sich, wie im statischen Fall, an den AP *CDEG-1*, *CDEG-3* und *CDEG-6* und wurden in der Graphik als Quadrate symbolisiert.

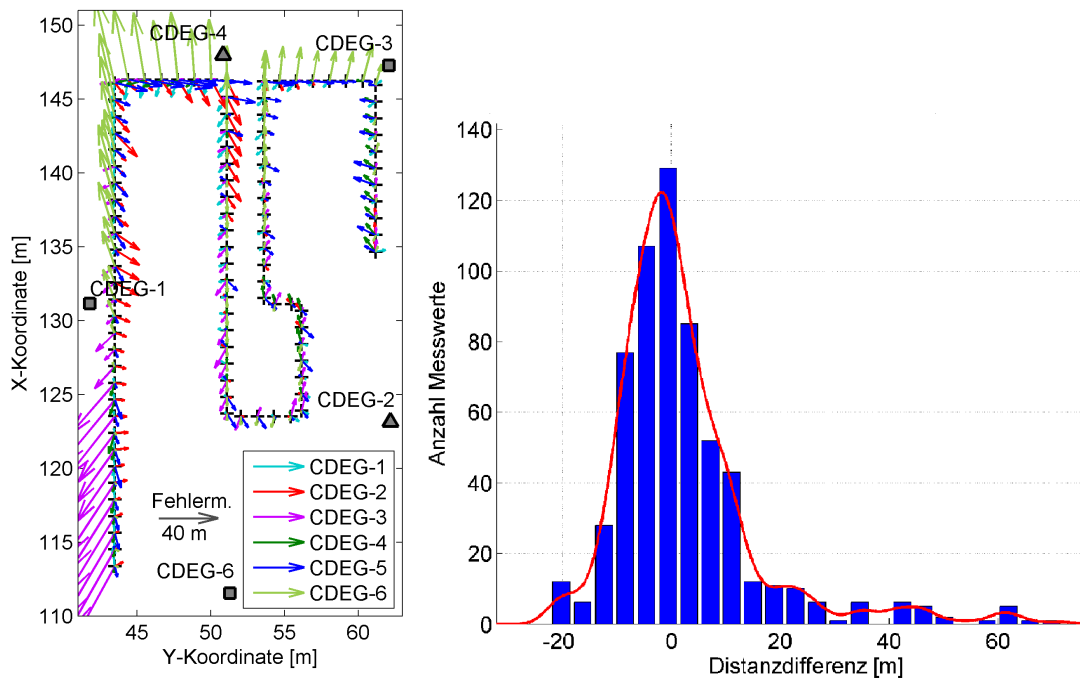


Abbildung 5.12: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, links: Vektorplot, rechts: Histogramm

In der 1. Methode des differentiellen Ansatzes zeigen sich wie im statischen Fall, im zentralen Bereich der drei Referenzstationen gute Ergebnisse in der Längenberechnung, siehe Abbildung 5.4. Ebenso sind markante Abweichungen des AP's *CDEG-3* im Foyer und des AP's *CDEG-6* im Hörsaal zu erkennen. Es handelt sich in beiden Fällen um NLOS-Beobachtungen, die sich am Rasterrand befinden. Wie bereits in der statischen Anwendung zeigten sich an diesen Bereichen markante Längenabweichungen. Im Histogramm ist zwar kein Versatz wie im One-Slope-Modell erkennbar, jedoch bewegen sich die größten Abweichungen bei 68 m.

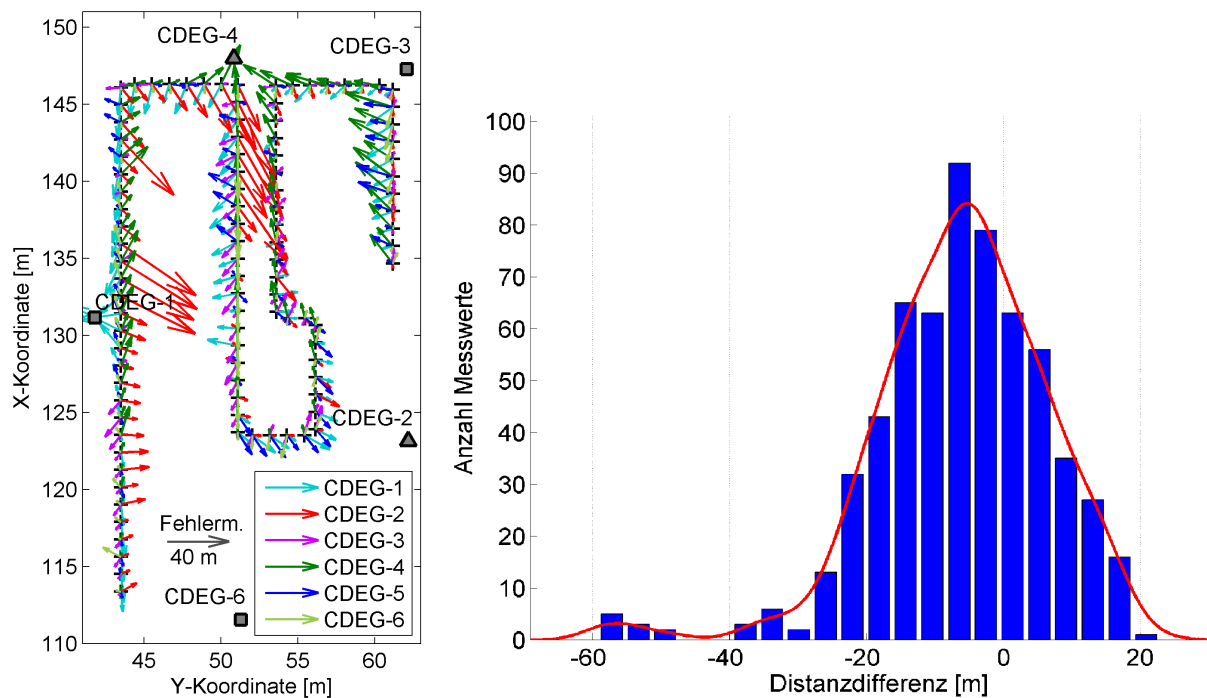


Abbildung 5.13: Abweichungen der abgeleiteten Distanz mit der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, links: Vektorplot, rechts: Histogramm

Wie im statischen Fall, treten in der 2. Methode, im linken oberen Bereich (Hörsaal) markante Längenabweichungen auf, siehe Abbildung 5.5. Allerdings zeigen sich diese nicht von dem Signal der AP *CDEG-1* und *CDEG-4*, sondern von *CDEG-2*. Das Histogramm zeigt, mit der Ausnahme der Signale von AP *CDEG-2* eine Normalverteilung, wobei die Längendifferenzen dieses AP bei 60 m liegen. Im Vergleich der beiden differentiellen Methoden ist auffällig, dass in der 1. Methode einige Längen signifikant zu lange und in der 2. Methode einige Längen zu kurz bestimmt wurden. Dies ist auf die beiden unterschiedlichen Funktionen zurückzuführen. Die logarithmische Funktion in der 1. Methode, schätzt zu schwache Signalstärken um ein beträchtliches Ausmaß zu lange Distanzen und die lineare Funktion schätzt starke Signalstärkendifferenzen zu kurzen Längendifferenzen.

In Tabelle 5.6 ist der Mittelwert und der Median der absoluten Längenabweichungen, sowie die dazugehörige Standardabweichung dargestellt.

Tabelle 5.6: Längenabweichungen in der kinematischen Positionierung

| $\Delta L[m]$           | Mittel | Median | $s_L$  |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| One-Slope-Modell        | 7.096  | 6.391  | 7.660  |
| Multi-Wall-Modell       | 8.905  | 7.346  | 10.311 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 8.336  | 5.658  | 12.695 |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 11.020 | 9.006  | 12.906 |

Hierbei ist ersichtlich, dass durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten keine Verbesserungen der invertierten Signalstärken eingetreten ist. Im Vergleich zu den statischen Scans in Tabelle 4.10, ist erkennbar, dass in den beiden differenziellen Methoden der Mittelwert, der Median und die Standardabweichungen angestiegen sind. Im One-Slope-Modell ohne Referenzstationsdaten zeigt sich eine geringfügige Verbesserung zum statischen Fall.

Da hier die Längeninvertierung mit dem Koeffizienten aus den statischen Messungen durchgeführt wurde, sind in einem weiteren Schritt die Koeffizienten aus den kinematischen Messungen des Smartphones *HTC Desire X* geschätzt worden. In Tabelle 5.7 sind diese Koeffizienten sowie der multiple und lineare Korrelationskoeffizient numerisch aufgelistet und mit dem statischen Koeffizienten, welche in Kapitel 4.5 geschätzt wurden gegenübergestellt.

Tabelle 5.7: Koeffizienten der Distanzfunktion im Vergleich der statischen und kinematischen Positionierung

|                    | Statisch    |                |        | Kinematisch |                |        |
|--------------------|-------------|----------------|--------|-------------|----------------|--------|
|                    | $P_0 / a_0$ | $\gamma / a_1$ | R / r  | $P_0 / a_0$ | $\gamma / a_1$ | R / r  |
| One-Slope-Modell   | -41,337     | -2,9464        | 0,678  | -44,209     | -2,3659        | 0,619  |
| Multi-Wall-Modell  | -44,964     | -2,2274        | 0,876  | -42,604     | -2,4431        | 0,633  |
| Diff.-A. 1.Methode | -24,103     | -3,8904        | 0,756  | -14,222     | -4,5455        | 0,699  |
| Diff.-A. 2.Methode | -4,9992     | -0,5707        | -0,732 | -1,6961     | -0,4309        | -0,593 |

Wie in der Tabelle erkennbar ist, zeigen die drei Varianten in der kinematischen Positionierung leichte Änderungen in den Koeffizienten, im Vergleich zum statischen Fall. Die multiplen Korrelationskoeffizienten der logarithmischen Distanzfunktion und der lineare Korrelationskoeffizient im 2. Ansatz, zeigen im kinematischen Fall niedrigere Werte auf, was auf eine größere Unsicherheit in den aufgestellten Modellen hinweist.

Tabelle 5.8 zeigt den Mittelwert und den Median der absoluten Längenabweichungen, sowie die dazugehörige Standardabweichung, welche mit den kinematischen Koeffizienten berechnet wurden.

Tabelle 5.8: Längenabweichungen mit den Koeffizienten aus der kinematischen Anwendung

| $\Delta L[m]$           | Mittel | Median | $s_L$  |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| One-Slope-Modell        | 7,096  | 6,391  | 7,660  |
| Multi-Wall-Modell       | 8,905  | 7,346  | 10,311 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 8,439  | 5,592  | 13,200 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 10,567 | 8,466  | 12,536 |

Im Vergleich zu Tabelle 5.6, die die Längenabweichungen der kinematisch gescannten Signalstärken mit den statischen Koeffizienten zeigt, können im One-Slope-Modell, sowie

auch bei den beiden differenziellen Ansätzen, keine Verbesserungen erzielt werden. Da sich größere Abweichungen in den abgeleiteten Distanzen und die linearen bzw. multiplen Korrelationskoeffizienten eine größere Unsicherheit in den kinematisch ermittelten Koeffizienten zeigen, wurde in weiterer Folge mit den ursprünglichen statischen Koeffizienten weitergearbeitet.

### 5.2.2 Positionsberechnung

Da sich in den vier Varianten der Signalstärkeninvertierungen einige markante Längenabweichungen zeigten, wurde wie in der statischen Anwendung eine Adaption der dänischen Methode zur niedrigen Gewichtung der Ausreißer eingesetzt. In Tabelle 5.9 ist die Anzahl der unterschiedlichen gewichteten Beobachtungen numerisch aufgelistet. In der Darstellung 5.14 ist gut erkennbar, dass im Multi-Wall-Modell und in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes einige Längenbeobachtungen niedrig gewichtet werden und somit auf die Positionsbestimmung einen geringen bzw. keinen Einfluss haben. In der 2. Methode des differenziellen Ansatzes funktioniert, wie in der statischen Anwendung, dieses Verfahren nicht und es werden gute Beobachtungen fälschlicherweise niedrig gewichtet. Aufgrund dieser Tatsache wird in dieser Variante von einer Gewichtung in der kleinsten Quadrate-Schätzung abgesehen.

Tabelle 5.9: Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen

|                         | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
|-------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| One-Slope-Modell        | 0         | 0               | 30              | 570       |
| Multi-Wall-Modell       | 2         | 9               | 86              | 497       |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 30        | 12              | 33              | 513       |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 0               | 9               | 591       |

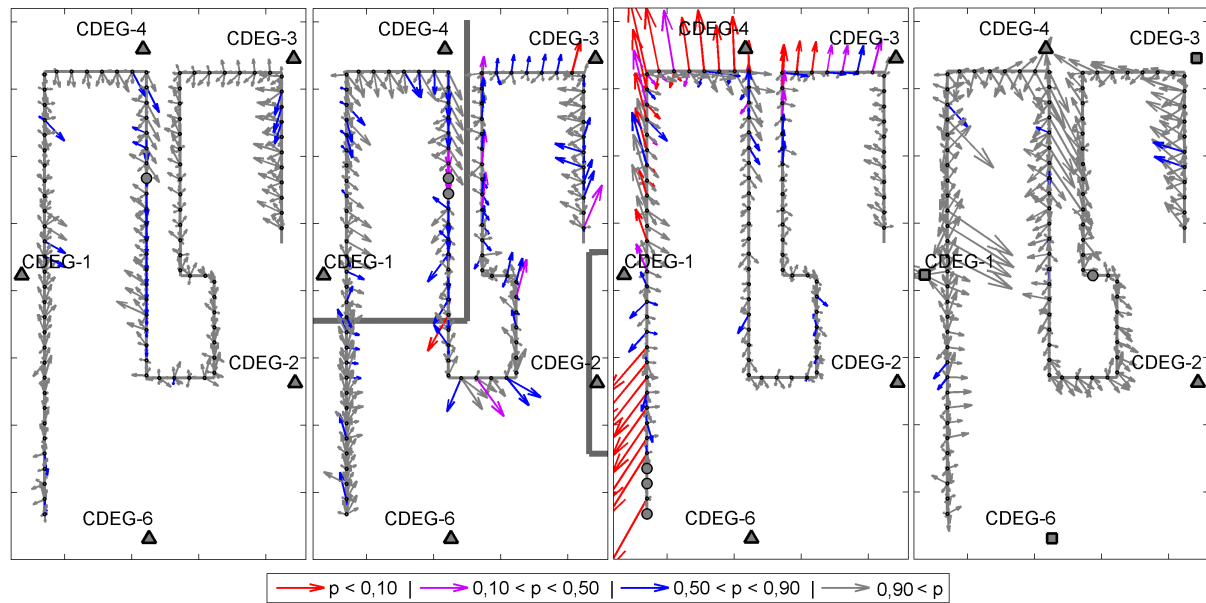


Abbildung 5.14: Gewichte  $p$  der Beobachtungen in der kinematischen Positionierung, von links nach rechts: One-Slope-Modell, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

Da der kleinste Quadrate-Ausgleich auch in der kinematischen Anwendung in manchen Fällen nicht konvergiert, zeigt Tabelle 5.10 die Anzahl der bestimmten Userspositionen.

Tabelle 5.10: Anzahl der bestimmten Positionen

|                         | Gesamt | Computerb. | Foyer | Hörsaal |
|-------------------------|--------|------------|-------|---------|
| Gesamtanzahl            | 101    | 31         | 30    | 40      |
| One-Slope-Modell        | 100    | 31         | 30    | 39      |
| Multi-Wall-Modell       | 99     | 31         | 30    | 38      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 98     | 31         | 27    | 40      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 100    | 31         | 29    | 40      |

In Abbildung 5.15 sind die Abweichungen der kinematischen Positionierung entlang vordefinierter Trajektorie, mit Hilfe eines Vektorplots, dargestellt. Im Gegensatz zur Darstellung der Längenabweichungen wurde in dieser Abbildung die Positionsabweichungen mit einem Faktor von 0,2 skaliert und in 5 Klassen eingeteilt, welche mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet sind.

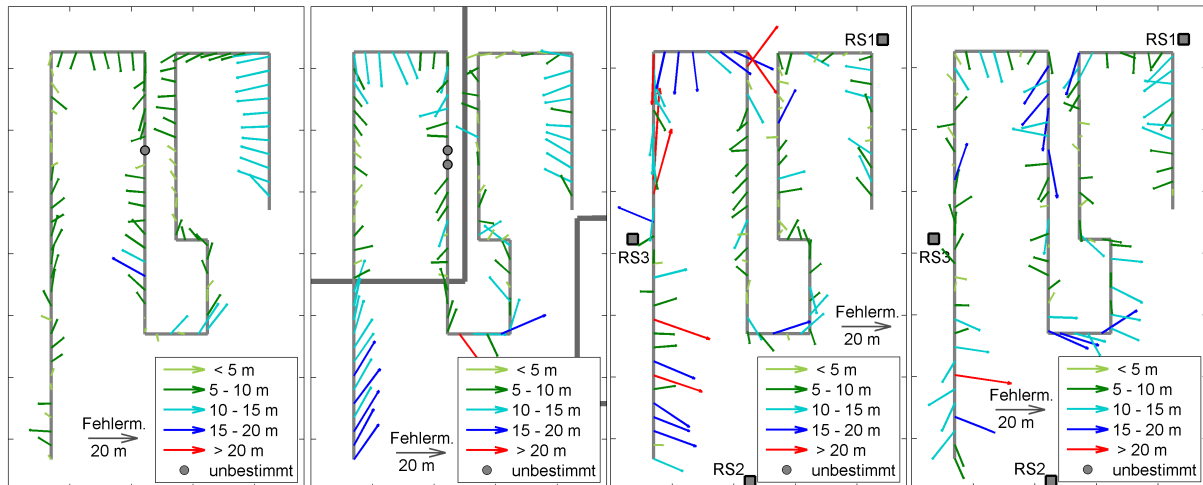


Abbildung 5.15: Positionsabweichungen der kinematischen Positionierung, von links nach: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

In Tabelle 5.11 ist der mittlere Positionsfehler und der Helmertsche Punktlagefehler, numerisch aufgelistet.

Tabelle 5.11: Mittlere Positionsabweichung und der Helmertsche Punktlagefehler in der kinematischen Positionierung

| $\Delta Position[m]$ | Gesamt |          | Computerb. |          | Foyer  |          | Hörsaal |          |
|----------------------|--------|----------|------------|----------|--------|----------|---------|----------|
|                      | Mittel | $s_{HP}$ | Mittel     | $s_{HP}$ | Mittel | $s_{HP}$ | Mittel  | $s_{HP}$ |
| One-Slope            | 7,19   | 7,90     | 8,64       | 9,33     | 6,02   | 6,85     | 6,93    | 7,40     |
| Multi-Wall           | 8,96   | 9,94     | 7,65       | 8,35     | 12,15  | 13,00    | 7,50    | 8,20     |
| Diff.-A. 1.          | 8,40   | 11,03    | 5,71       | 6,22     | 4,69   | 4,97     | 13,00   | 15,86    |
| Diff.-A. 2.          | 9,63   | 11,00    | 8,82       | 10,00    | 10,40  | 12,14    | 9,69    | 10,86    |

Wie im statischen Fall wurde eine räumliche Separation der Positionsabweichungen durchgeführt. Ebenfalls sind die 95 % Konfidenzellipsen, welche aus der Kovarianzmatrix aller Positionsabweichungen abgeleitet wurden, in der folgenden Abbildung dargestellt.



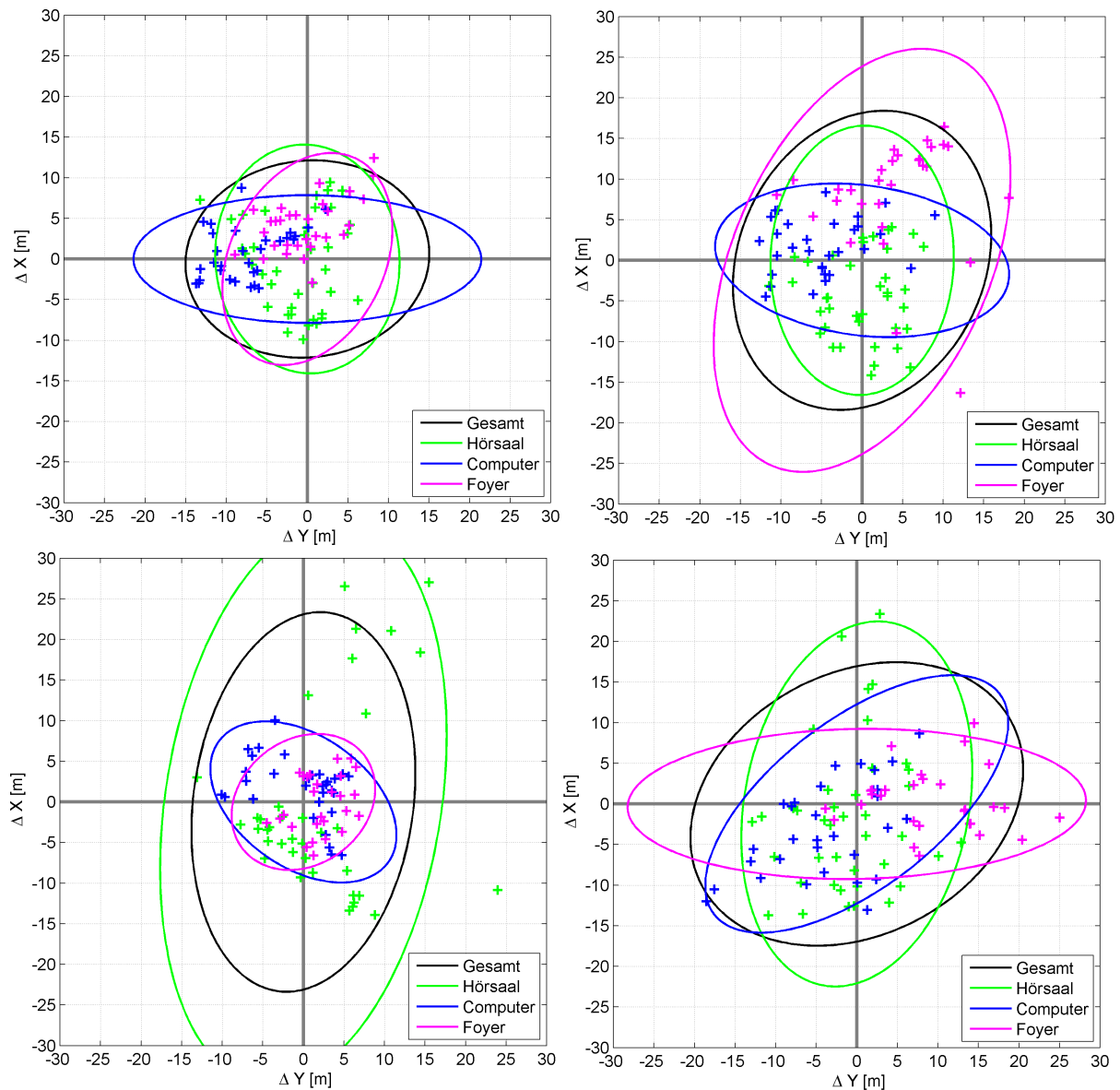


Abbildung 5.16: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode -, rechts unten: 2. Methode des differenziellen Ansatzes

Wie bereits in Abbildung 5.10 der Längenabweichungen ersichtlich, treten in der kinematischen Positionierung im One-Slope-Modell ohne Referenzstationsdaten bereits sehr gute Ergebnisse auf. Die 1. und 2. Methode des differenziellen Ansatzes zeigen durch die Hinzunahme der Referenzstationen nur geringfügige Verbesserung in den bestimmten Positionen des Users, wobei die 1. Methode im Vergleich zur 2. Methode des differenziellen Ansatzes, bessere Ergebnisse aufweist. In weiterer Folge zeigen sich, wie im statischen Fall, bei der räumlichen Separation markante Unterschiede in der Positionierungsgenauigkeit in den beiden differenziellen Ansätzen. In der 1. Methode zeigen sich gute Ergebnisse im

Computerbereich und Foyer, aber im Hörsaal kommt es zu großen Unterschieden in den Abweichungen. Im Gegensatz zur 2. Methode, denn hier zeigen die bestimmten Positionen im Hörsaal geringere Abweichungen als im Foyer und Computerbereich.

Es muss aber festgehalten werden, dass sich ohne Referenzstationsdaten bereits gute Ergebnisse zeigen und die Abweichungen im Vergleich zur statischen Variante unterschritten werden. In den beiden differenziellen Methoden zeigen sich in der kinematischen Positionierung, die Positionsabweichungen in der selben Größenordnung, wie im statischen Fall.

### **Zusammenfassung**

In diesem Kapitel 5 wurden die Machbarkeiten der Positionierung, anhand der praktischen WLAN-Signalstärkenscans, mit Hilfe der Trilateration aufgezeigt. Durch das hohe Signalrauschen, das sich bereits in den Voruntersuchungen zeigte, zeichnen sich bei der Positionierung große Diskrepanzen auf. In der weiteren Folge wurden durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten die beiden differenziellen Ansätze praktisch angewendet. Hierbei zeigte sich in der statischen Positionierung in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes im Computerbereich eine Reduktion der mittleren Positionsabweichungen von 9 m auf 5 m. Des Weiteren konnten auch große räumliche Variationen festgestellt werden. In der kinematischen Anwendung zeigen sich bereits ohne Referenzdaten gute Ergebnisse und die mittleren Positionsabweichungen liegen bei 7 m. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes konnten im Computerbereich und Foyer die mittleren Positionsabweichungen deutlich reduziert werden. In der 2. differenziellen Methode wurden keine wesentlichen Verbesserungen erzielt und es kommt in allen Räumlichkeiten zu größeren Abweichungen in der berechneten Trajektorie, als ohne Referenzdaten.

Im Vergleich der beiden differenziellen Ansätze, zeigt die 1. gegenüber der 2. Methode, in der statischen wie auch in der kinematischen Positionierung, bessere Ergebnisse. Es muss aber festgehalten werden, dass in der 1. Methode die tatsächliche Userposition zur Interpolation der Korrekturwerte verwendet wurde. Da diese Position in der Praxis nicht bekannt ist, können die interpolierten Korrekturwerte nur in einem iterativen Prozess bestimmt werden. Dies ist ein bedeutsamer Vorteil in der 2. Methode des differenziellen Ansatzes, wo die Differenzenbildung mit jedem verfügbaren Referenzsignal stattfindet.

In der statischen wie auch in der kinematischen Anwendung wurde das Smartphone *HTC Desire X* betrachtet, da dieses die besten Ergebnisse in den beiden Anwendungsbereichen aufzeigten. Die Vergleiche der einzelnen Smartphones in der kinematischen, sowie in der statischen Positionierung, werden in Kapitel 6.3 präsentiert.

## 6 Analysen

In diesem Kapitel werden anhand der praktisch durchgeführten Signalstärkenscans diverse Untersuchungen realisiert. Im ersten Teil wird die Positionsbestimmung mit einer robusten Schätzmethode durchgeführt und dem kleinsten Quadrate-Ausgleich (*engl. Least Squares Adjustment, kurz: LSA*) gegenübergestellt. Im mittleren Teil wird die Auswirkung auf die Wahl des Standortes der Referenzstation näher untersucht und im letzten Abschnitt werden die Positionierungsergebnisse der drei Smartphones in der statischen, wie auch in der kinematischen Positionierung gegenübergestellt.

### 6.1 Vergleich der Ausgleichungsart

Da sich bereits in der praktischen Anwendung der Ausbreitungsmodelle ein Nichteinhalten der Normalverteilung in den abgeleiteten Längen zeigte und die kleinste Quadrate-Schätzung hierbei Probleme aufweist, wird in diesem Schritt ein robustes Schätzverfahren zur Positionsermittlung angewendet und mit der Methode der kleinsten Quadrate verglichen. Wie bereits im letzten Kapitel der Positionierung, werden in der statischen und kinematischen Anwendung das Smartphone *HTC Desire X* betrachtet.

#### 6.1.1 Statische Positionierung

In der robusten Schätzmethode mit Least-Median-Square kommen, wie im kleinsten Quadrate-Ausgleich, dieselben abgeleiteten Längen der gescannten Signalstärken der einzelnen AP vor. Die Tabelle 6.1 zeigt die Anzahl der bestimmten Positionen mittels der robusten Schätzung. Im Vergleich zur Tabelle 5.4, welche die Anzahl der bestimmten Positionen in der kleinsten Quadrate-Schätzung zeigt, ist erkennbar, dass bei der robusten Methode, mit der Ausnahme des One-Slope-Modells, alle Positionen bestimmt wurden. Obwohl bei nicht schneiden der LOP's in der robusten Methode keine Position bestimmt werden kann und im kleinsten Quadrate-Ausgleich sehr wohl eine Positionsbestimmung möglich ist.

Tabelle 6.1: Anzahl der bestimmten Positionen mittels Least-Median-Square

|                         | Gesamt | Computerb. | Foyer | Hörsaal |
|-------------------------|--------|------------|-------|---------|
| Gesamtanzahl            | 372    | 100        | 144   | 128     |
| One-Slope-Modell        | 367    | 100        | 144   | 123     |
| Multi-Wall-Modell       | 372    | 100        | 144   | 128     |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 372    | 100        | 144   | 128     |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 372    | 100        | 144   | 128     |

In Abbildung 6.1 ist der Positionierungsfehler der vier Varianten der robusten Schätzung als Vektorplot dargestellt. Zur Übersichtlichkeit wurden die Vektoren mit einem Faktor von 0,1 skaliert. Im Vergleich zu Abbildung 5.7 ist erkennbar, dass sich bei allen vier Varianten die Positionierungsfehler in derselben Größenordnung wiederfinden, wie bei der kleinsten Quadrate-Schätzung, obwohl an jedem Rasterpunkt und zu jeder Userorientierung differente Koordinaten berechnet wurden. Ebenfalls zeigt sich im unteren Rasterbereich (Foyer) bei allen vier Varianten eine erhöhte Abweichung der Userposition. Die besten Positionierungsergebnisse konnten in den beiden Ausgleichsverfahren im Computerbereich in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes erzielt werden.

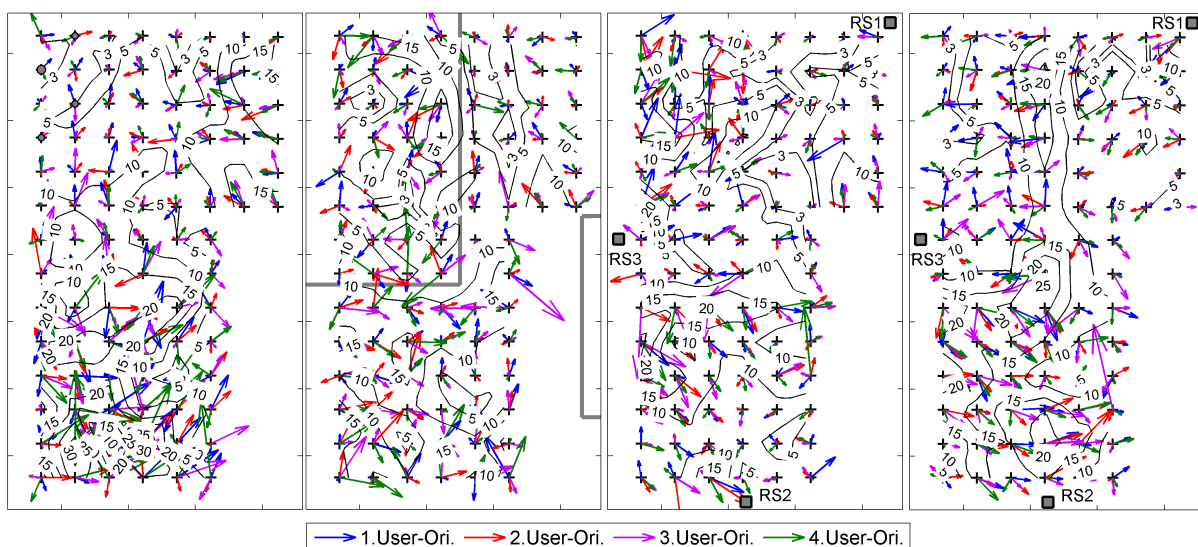


Abbildung 6.1: Positionsabweichungen von links nach rechts: One-Slope- , Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

Zur besseren Gegenüberstellung der beiden Ausgleichsvarianten ist in Abbildung 6.2 die mittlere Positionsabweichung, der gesamten Rasterpunkte in der räumlichen Separation, als Balkendiagramm dargestellt. Der kleinste Quadrate-Ausgleich (*LSA*) wurde in roten Balken und die Least-Median-Square-Schätzung (*LMS*) in blauen Balken dargestellt.

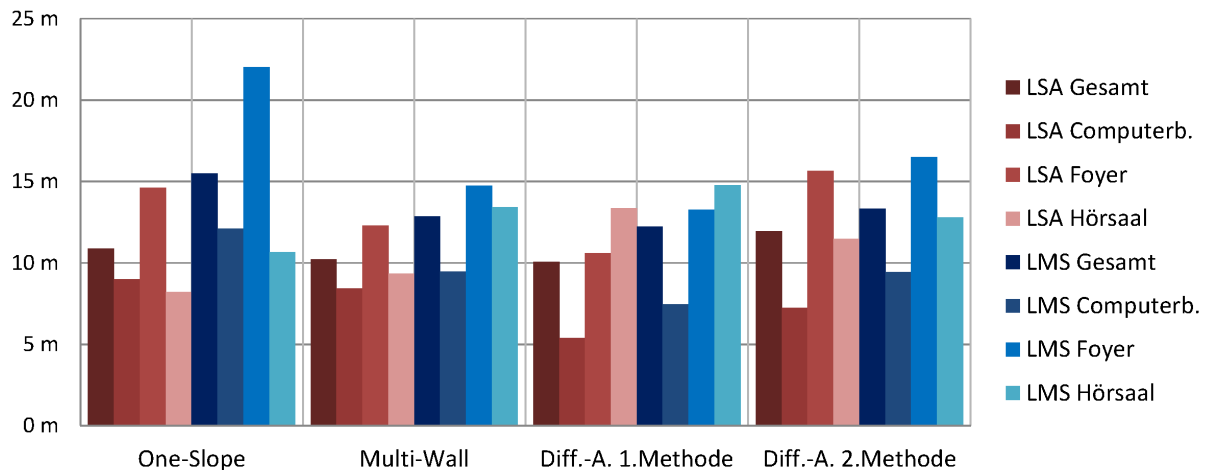


Abbildung 6.2: Vergleich der mittleren Positionsabweichungen in der statischen Positionierung, kleinste Quadrate-Ausgleich (rote Balken) mit Least-Median-Square-Schätzung (blaue Balken)

In Abbildung 6.3 wird die große Halbachse der 95 % Konfidenzellipse als Vergleichsparameter herangezogen. Wie in der oberen Darstellung sind die vier Methoden in den räumlichen Separationen, in der kleinsten Quadrate-Ausgleichung als rote Balken und das LMS-Verfahren als blaue Balken dargestellt.

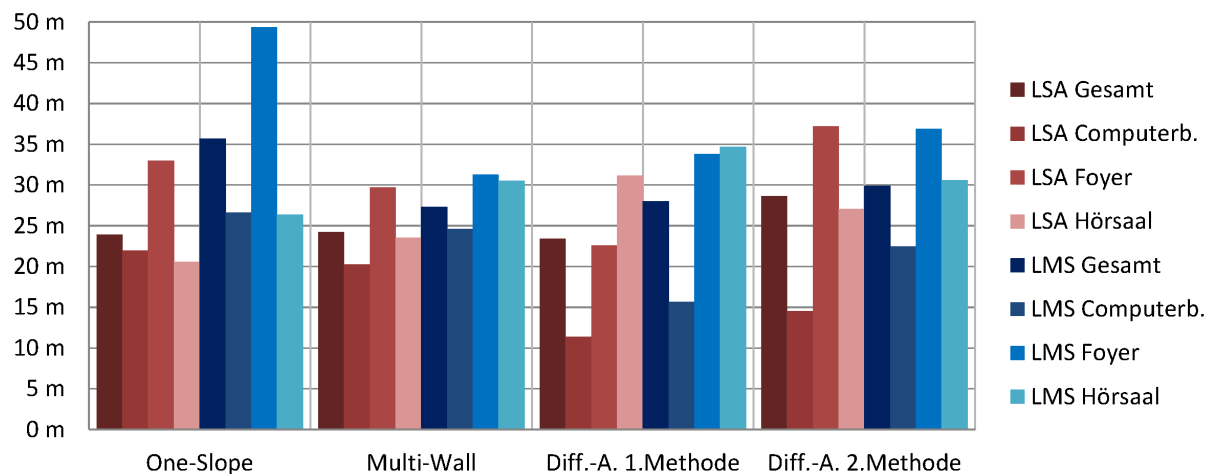


Abbildung 6.3: Vergleich der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse in der statischen Positionierung, kleinste Quadrate-Ausgleich (rote Balken) mit Least-Median-Square-Schätzung (blaue Balken)

Im Vergleich der beiden Ausgleichsverfahren, ist in den beiden differenziellen Positionierungsmethoden ein nahezu identes Bild der mittleren Positionsabweichungen und der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse ersichtlich, wobei das LMS-Verfahren eine geringfügige Erhöhung der Abweichung aufweist. Es muss aber berücksichtigt werden,

dass in der 1. Methode im Foyer in der kleinsten Quadrate-Ausgleichung 40 Positionen nicht bestimmt werden konnten. Im One-Slope-Modell ist im Foyer eine deutliche Verschlechterung durch die robuste Methode ersichtlich, die mittlere Positionsabweichung ist um 7,4 m gestiegen. In der Signalstärkenkonvertierung des Multi-Wall-Modells zeigt sich ebenfalls ein sehr identes Bild der robusten Schätzung, wobei sich im Computerbereich und im Hörsaal eine geringe Verschlechterung von 1,0 m bzw. 4,1 m der mittleren Positionsabweichungen abzeichnet.

### 6.1.2 Kinematische Positionierung

In Tabelle 6.2 ist die Anzahl der bestimmten Positionen in der kinematischen Anwendung mit dem robusten Schätzverfahren dargestellt. Im Vergleich zur ersten Ausgleichsart, siehe Tabelle 5.10, ist ersichtlich, dass im Gegensatz zum kleinsten Quadrate-Ausgleich, im One-Slope-Modell weniger und in der 1. und 2. Methode des differenziellen Ansatzes mehr Positionen bestimmt werden konnten.

Tabelle 6.2: Anzahl der bestimmten Least-Median-Square in der kinematischen Positionierung

|                         | Gesamt | Computerb. | Foyer | Hörsaal |
|-------------------------|--------|------------|-------|---------|
| Gesamtanzahl            | 101    | 31         | 30    | 40      |
| One-Slope-Modell        | 99     | 31         | 30    | 38      |
| Multi-Wall-Modell       | 99     | 31         | 30    | 38      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 101    | 31         | 30    | 40      |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 101    | 31         | 30    | 40      |

Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse der robusten Schätzung der kinematischen Positionierung als Vektorplot. Ebenfalls wurden die Vektoren mit einem Faktor von 0,2 zur Übersichtlichkeit skaliert. Die robuste Ausgleichung zeigt in allen vier Methoden gravierende Unterschiede zum kleinsten Quadrate-Ausgleich in den berechneten Trajektorien auf, siehe Abbildung 5.15. In den beiden Varianten ohne Referenzdaten zeigen sich in der robusten Schätzung deutliche Verschlechterungen in der bestimmten Trajektorie des Users. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes sind ebenfalls erhöhte Abweichungen erkennbar. In der 2. Methode hingegen zeigt das LMS-Verfahren an einigen Teilstücken der Trajektorie durchaus Verbesserungen auf. Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass im kleinsten Quadrate-Ausgleich in der 2. Methode des differenziellen Ansatzes keine Gewichtung der Beobachtungen stattgefunden hat.

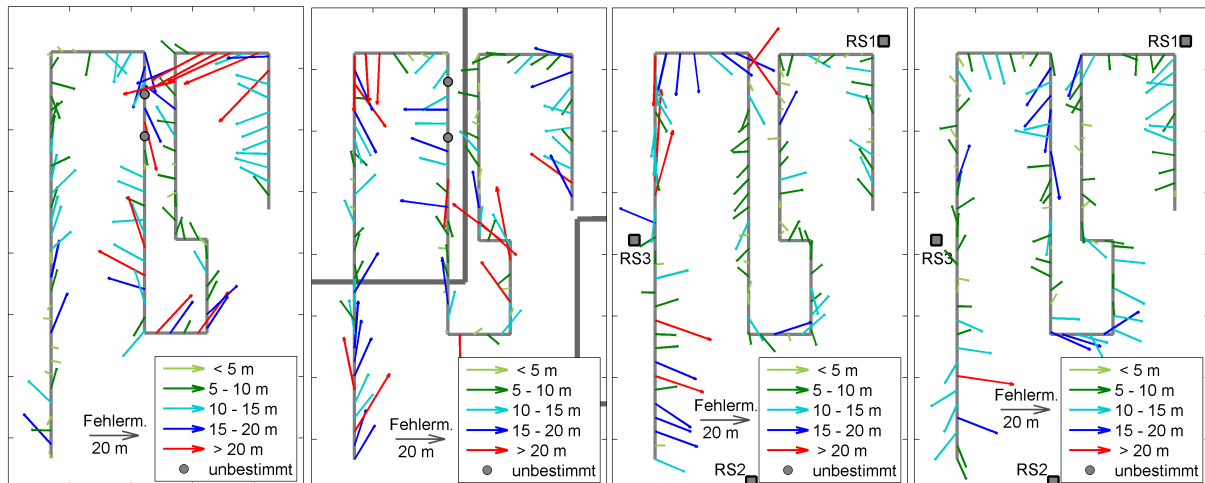


Abbildung 6.4: Positionsabweichungen der kinematischen Positionierung in der robusten Schätzung, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

In den beiden Abbildungen 6.5 und 6.6 sind wiederum die mittleren Positionsabweichungen und die große Halbachse als Vergleichsparameter in einem Balkendiagramm dargestellt.

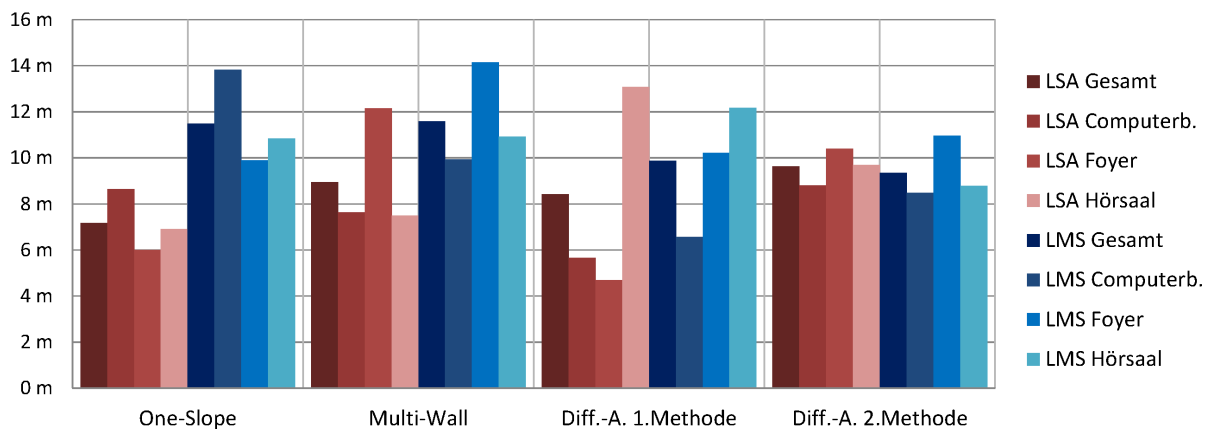


Abbildung 6.5: Vergleich der mittleren Positionsabweichungen in der kinematischen Positionierung, kleinste Quadrate Ausgleich (rote Balken) mit Least-Median-Square-Schätzung (blaue Balken)

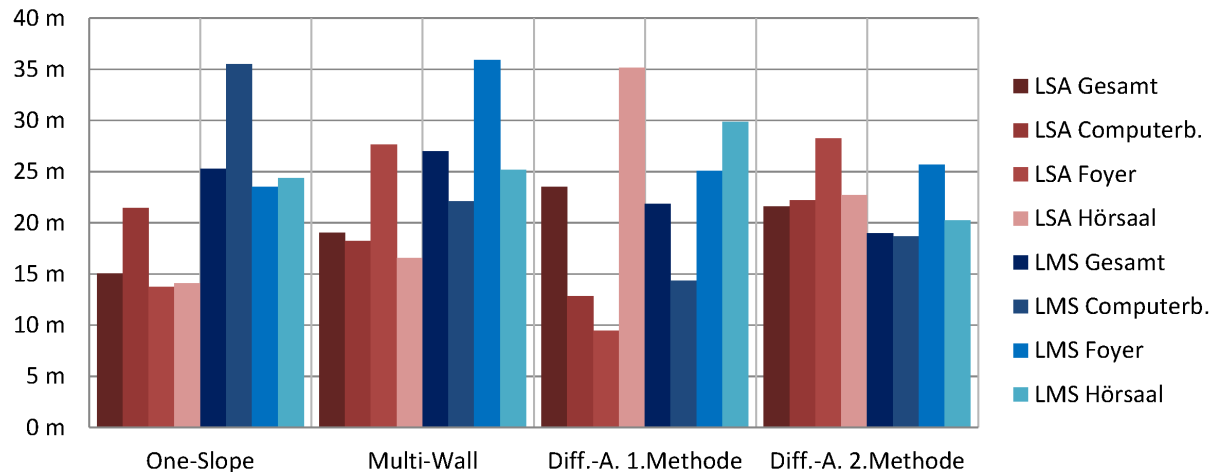


Abbildung 6.6: Vergleich der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse in der kinematischen Positionierung, kleinste Quadrate-Ausgleich (rote Balken) mit Least-Median-Square-Schätzung (blaue Balken)

In der direkten Gegenüberstellung der mittleren Positionsabweichungen zeigt die robuste Schätzung im One-Slope- und Multi-Wall-Modell einen markanten Anstieg der Positionsabweichungen. Die mittleren Positionsabweichungen sind im One-Slope-Modell um 4,3 m und im Multi-Wall-Modell um 2,64 m gestiegen. In beiden differenziellen Methoden ist bei den beiden Vergleichsparametern ein sehr ähnliches Bild erkennbar, mit der Ausnahme der 1. Methode im Foyer. Hier vergrößerten sich in der robusten Methode die mittleren Positionsabweichungen um 5,5 m. In der 2. Methode konnten in allen Räumlichkeiten die Positionsabweichungen minimal gesenkt werden. Die mittlere Positionsabweichung konnte um 0,3 m verringert werden.

## 6.2 Standort der Referenzstationen

Um den Einfluss des Standortes der Referenzstationen zu eruieren, werden zwei Referenzstationen in einem weiteren Scandurchgang an den koordinativ bekannten Punkten, RS4 und RS5 positioniert, siehe Abbildung 4.3. Zu dieser Untersuchung werden die Scans in der statischen Anwendung mit dem Smartphone *HTC Desire X* herangezogen. Als Ausgleichsart wird der kleinste Quadrate-Ausgleich verwendet, wobei in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes wieder eine Adaption der dänischen Methode zur Gewichtung der Beobachtungen eingeführt wird.

Diese beiden Referenzstationen befinden sich in einer Entfernung von 8,95 m (RS4 zu *CDEG-3*) und 6,54 m (RS5 zu *CDEG-6*) zum nächstgelegenen AP. Der dritte Raspberry bleibt für Langzeitbeobachtungen an RS3 direkt unter *CDEG-1*. In der Zeitreihe der Si-



gnalstärkescans der beiden Raspberry's an den Standorten RS4 und RS5 ist erkennbar, dass die AP's *CDEG-3* bei RS4 und *CDEG-6* bei RS5, eine deutlich höhere Signalstärke aufweisen, als im vorherigen Fall, wo sich die Raspberry's direkt unter den AP's befanden. Im Vergleich ist in Abbildung A.3 AP *CDEG-3* deutlich höher, als in Abbildung A.1. Die Ursache ist auf den Antennengewinn zurückzuführen, welcher in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben wurde. Die verwendeten WLAN-Antennen sind Rundantennen, die zwar horizontal ein gleichförmiges Strahlungsdiagramm zeigen, aber in vertikaler Ebene mehrere Ausbuchtungen aufweisen, siehe Abbildung 2.7, weswegen bei einer weiter entfernten Referenzstation stärkere Signalstärken auftreten.

Im ersten Schritt wurde, wie in Kapitel 5, eine Distanzableitung der korrigierten Signalstärken in der 1. Methode bzw. in der 2. Methode des differentiellen Ansatzes mit den Signalstärkendifferenzen durchgeführt. In den beiden Abbildungen 6.7 und 6.8 sind die Abweichungen der Distanzableitung der 4 Userausrichtungen aller Rasterpunkte dargestellt. Wie im ersten Fall zeigt die 1. Methode einige markante Abweichungen der invertierten Signalstärken zu einzelnen weit entfernten AP's *CDEG-3*, *CDEG-5* und *CDEG-6*. In der 2. Methode des differentiellen Ansatzes ergeben sich keine herausragenden Abweichungen in den abgeleiteten Distanzen.

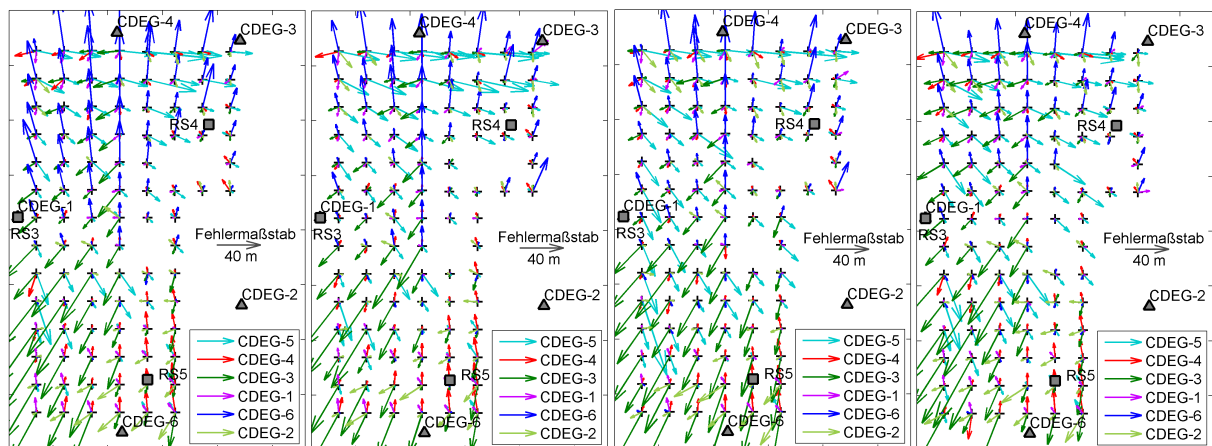


Abbildung 6.7: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

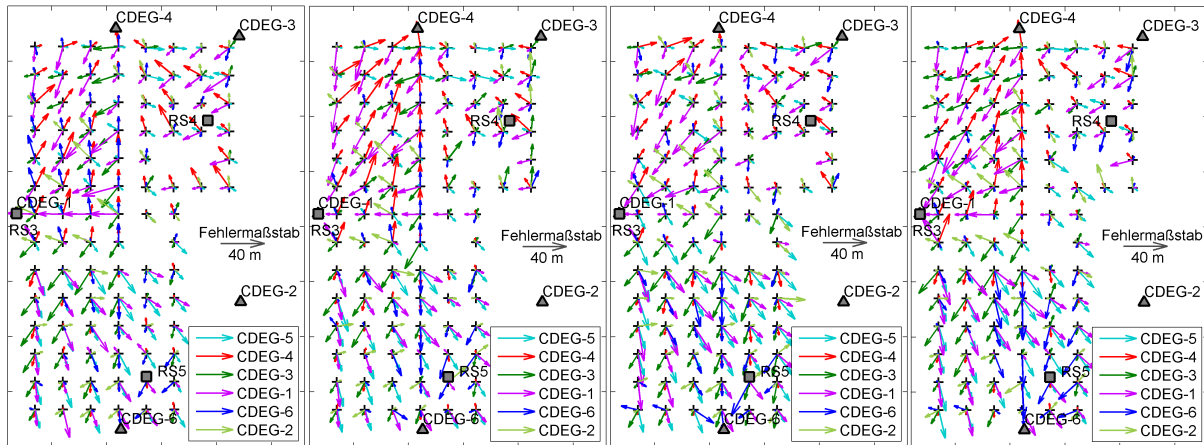


Abbildung 6.8: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierungen 1-4

Wie in den beiden Histogrammen in Abbildung 6.9 erkennbar, zeigen die Längenabweichungen der 2. Methode wiederum eine Normalverteilung und die größten Längenabweichungen belaufen sich auf 44 m. In der 1. Methode des differentiellen Ansatzes ist erkennbar, dass viele Längen durch zu geringe Signalstärken zu lange bestimmt werden, die größten Differenzen belaufen sich auf 77 m.

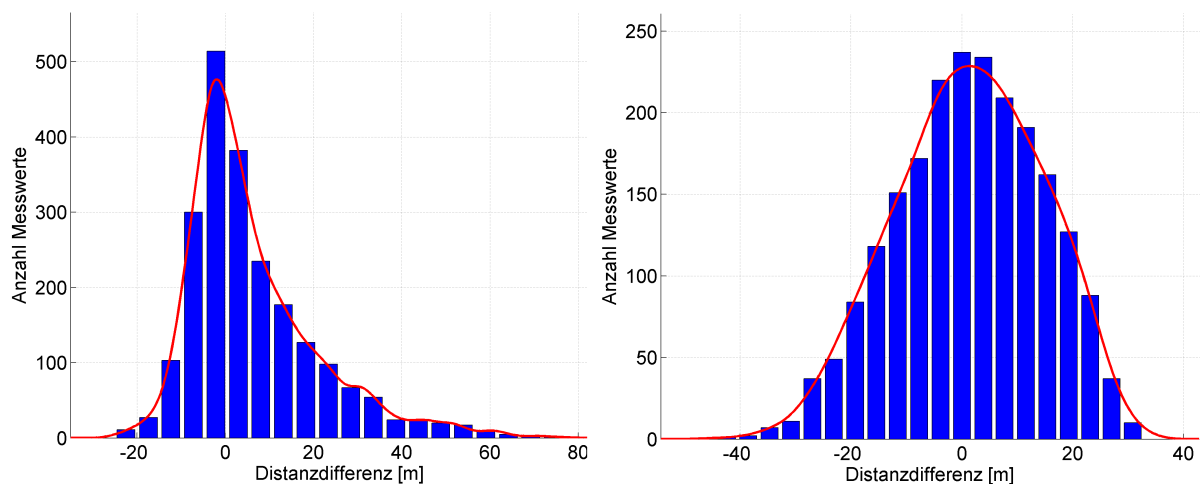


Abbildung 6.9: Histogramm der Abweichungen der Distanzableitungen, links: 1. Methode des differentiellen Ansatzes, rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

Bei einer genaueren Betrachtung in Abbildung 6.7 ist erkennbar, dass in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes die Längenabweichungen der Rasterpunkte, die sich in unmittelbarer Nähe zur Referenzstation befinden, geringere Längenabweichungen aufzeigen, als jene, die sich weit entfernt befinden. Deshalb ist in Abbildung 6.10 die Längenabweichung als Funktion der Distanz zur nächstgelegenen Referenzstation dargestellt. Zur besseren

Veranschaulichung wurde ein lineares Polynom approximiert. Hierbei ist in der 1. Methode ein direktes Verhältnis zwischen Längenabweichung aus den invertierten Signalstärken und dem Abstand zur nächstgelegenen Referenzstation erkennbar. In der 2. Methode ist dieser Trend schwächer ausgeprägt, wobei sich im Allgemeinen die Längenabweichungen in einem kleineren Bereich zwischen 5 und 40 m befinden.

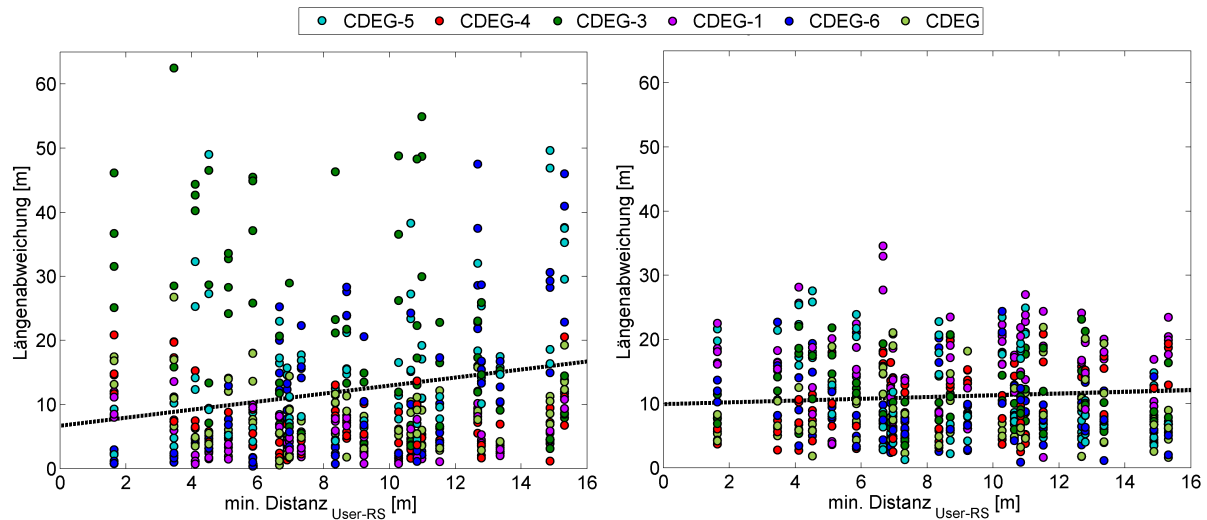


Abbildung 6.10: Längenabweichungen zur nächstgelegenen Referenzstation, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

Wie in Kapitel 5.1.2 wird in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes eine Gewichtung und in der 2. Methode keine Gewichtung der Beobachtung im kleinsten Quadrate-Ausgleich durchgeführt. Tabelle 6.3 zeigt die Anzahl der unterschiedlich gewichteten Beobachtungen im direkten Vergleich zur Variante, wo sich die RS direkt unter den AP befinden, jeweils in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes. Dabei ist erkennbar, dass in diesem Fall deutlich mehr Beobachtungen niedriger gewichtet werden. Im Vergleich der Anzahl der bestimmten Positionen ist in Tabelle 6.4 ersichtlich, dass in dieser Variante, in der 1. Methode um 37 Positionen mehr und in der 2. differentiellen Methode um 5 Positionen weniger bestimmt wurden.

Tabelle 6.3: Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen für die 1. Methode des differentiellen Ansatzes

|           | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $p < 0,9$ |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| RS bei AP | 56        | 35              | 180             | 1494      |
| RS frei   | 178       | 80              | 299             | 1529      |

Tabelle 6.4: Anzahl der bestimmten Positionen

|                         | Gesamt | Computerb. | Foyer | Hörsaal |
|-------------------------|--------|------------|-------|---------|
| Gesamtanzahl            | 372    | 100        | 144   | 128     |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 367    | 100        | 143   | 124     |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 367    | 100        | 141   | 126     |

Im Ergebnis der Positionierung ist in der folgenden Darstellung 6.11 erkennbar, dass im Vergleich der Variante, wo sich die Referenzstationen direkt unter den AP befinden, die Positionsabweichungen bei allen beiden Methoden angestiegen sind, siehe Abbildung 5.7. Auch in den Darstellungen 6.12 der Positionsabweichungen mit den 95 % Konfidenz-ellipsen, ist im Vergleich zu Abbildung 5.9 erkennbar, dass grundsätzlich in der 1. und 2. differenziellen Methode die Userpositionen schlechter bestimmt wurden, wenn sich die Referenzstationen sich direkt unter den AP's befinden.

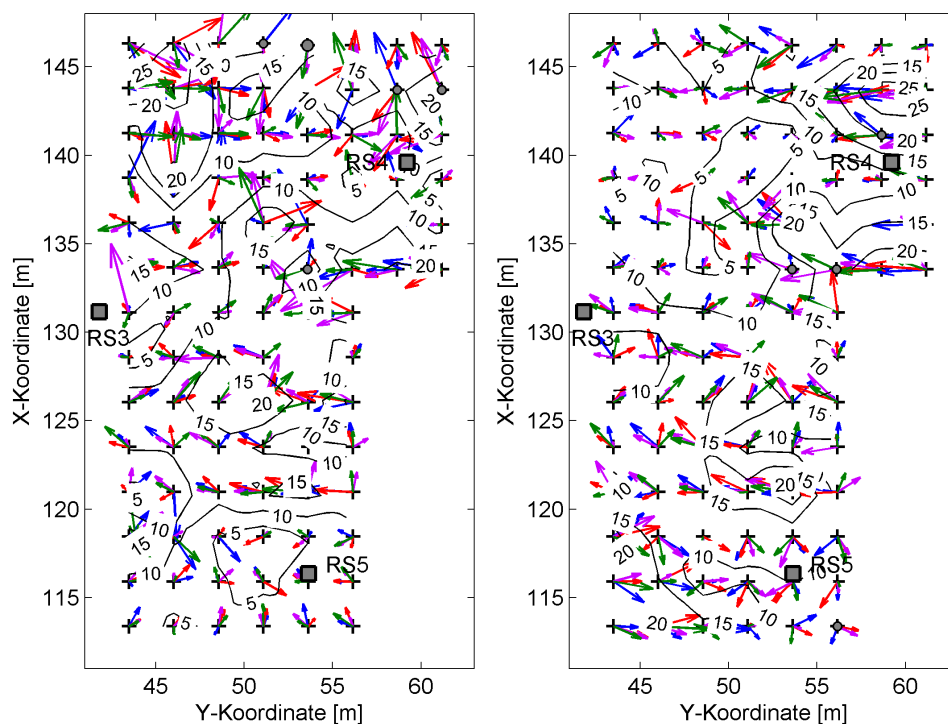


Abbildung 6.11: Positionsabweichungen, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differenziellen Ansatzes

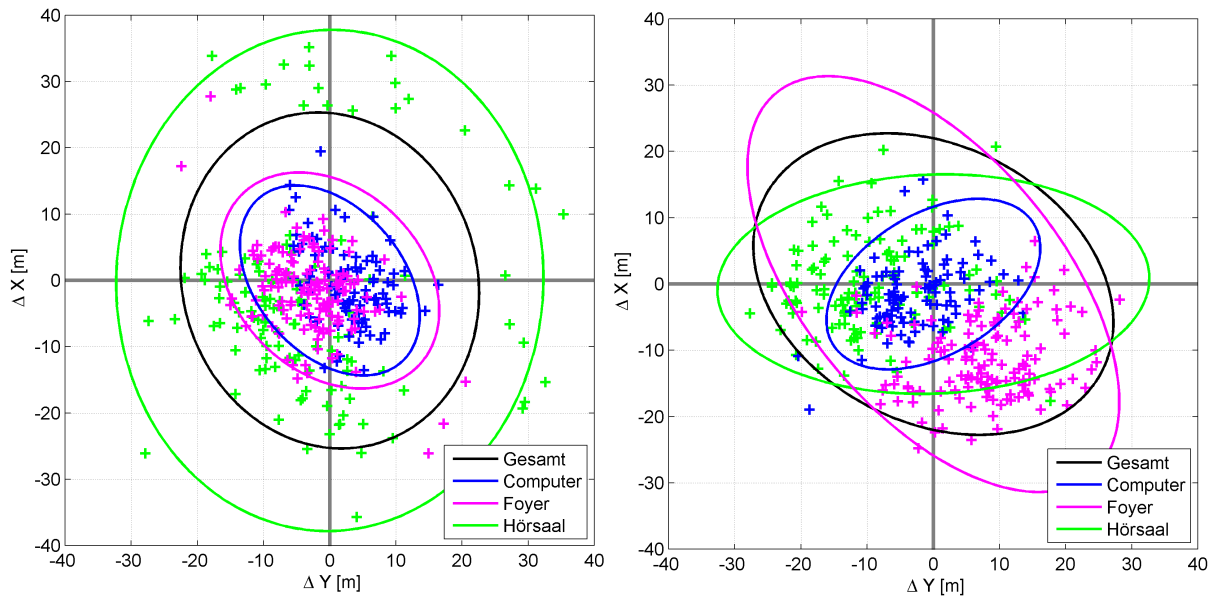


Abbildung 6.12: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

Da sich bereits in den Abweichungen der invertierten Signalstärkenscans ein Zusammenhang zum Abstand der Referenzstationen abzeichnete, wurde in Abbildung 6.13 die Positionsabweichung des Users ebenfalls in Funktion der nächstgelegenen Referenzstation dargestellt. Hierbei ist wiederum in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes ein direkter Zusammenhang erkennbar. Durch Verringerung des Abstandes zwischen den Referenzstationen, wäre somit eine bessere Positionsbestimmung mit einer geringeren Abweichung möglich. Beispielsweise beläuft sich bis 7 m Abstand zwischen User und Referenzstation die mittlere Positionsabweichung auf 9,0 m und der Median auf 7,8 m. Bei einer dreieckigen Anordnung der Referenzstationen ergibt sich so ein Abstand von 12,1 m und bei einer quadratischen Anordnung von 9,9 m zwischen den einzelnen Referenzstationen.

In der 2. Methode des differentiellen Ansatzes ist, wie in den Längenabweichungen, dieser Trend wesentlich schwächer ausgeprägt. Die Positionsabweichungen aller Rasterpunkte befinden sich in einem kleineren Intervall, wobei sich die größten Positionsabweichungen in einer Größenordnung von 28,3 m belaufen.

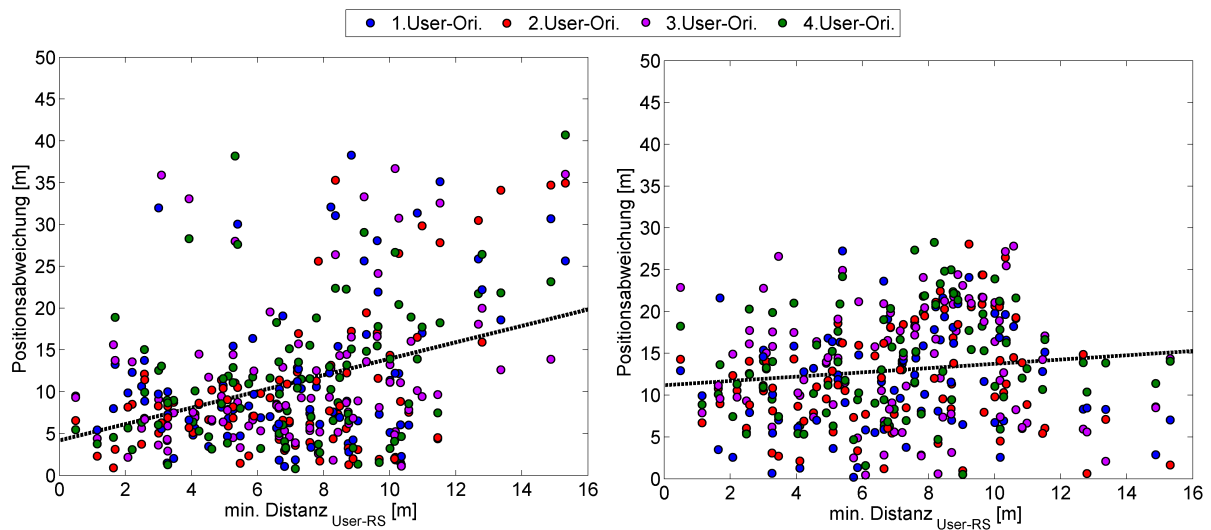


Abbildung 6.13: Positionsabweichungen zur nächstgelegenen Referenzstation, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

In den beiden Abbildungen 6.14 und 6.15 ist dieser Scandurchgang der ursprünglichen Variante, bei welcher sich die Referenzstationen direkt unter den AP befinden, gegenübergestellt. Als Vergleichsparameter ist die mittlere Positionsabweichung und die große Halbachse der 95 % Konfidenzellipse, in den räumlichen Separationen herangezogen. In diesen Abbildungen ist erkennbar, dass sich in allen Räumlichkeiten, mit der Ausnahme des Foyers in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, die Ergebnisse der Positionierung geringfügig verschlechtert haben. Die größten Unterschiede in den beiden Varianten zeigen sich im Hörsaal. Hier hat sich in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes die mittlere Positionsabweichung um 4,7 m und in der 2. Methode um 2,2 m vergrößert.

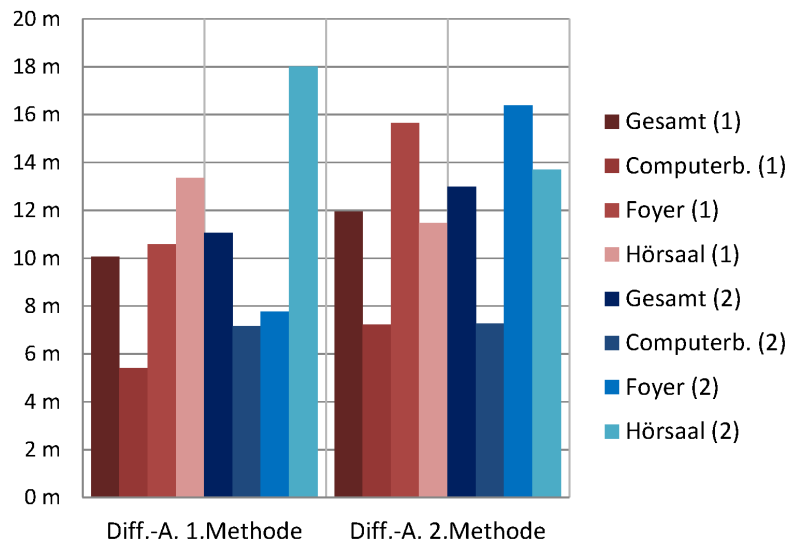


Abbildung 6.14: Vergleich mittleren Positionsabweichung, Referenzstationen direkt unter AP (rote Balken), zwei Referenzstationen an freien Punkten (blaue Balken)

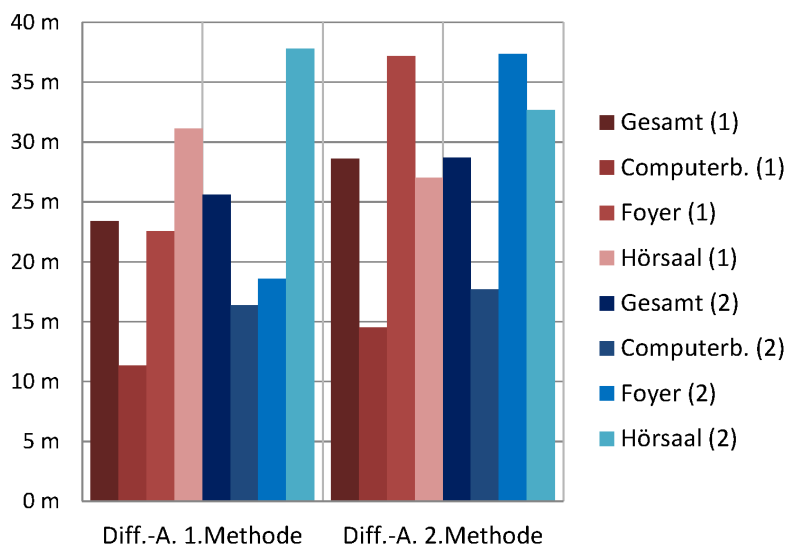


Abbildung 6.15: Vergleich der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse, Referenzstationen direkt unter AP (rote Balken), zwei Referenzstationen an freien Punkten (blaue Balken)

## 6.3 Vergleich der unterschiedlichen Smartphones

Bereits in den Voranalysen zeigte sich im Zusammenhang zwischen den drei Smartphones und der Raspberry Pi Konsole, eine Differenz der empfangenen WLAN-Signalstärken der einzelnen Smartphones. In weiterer Folge wurden auch in den vier Varianten der Signalstärkeninvertierung, in den berechneten Koeffizienten, Unterschiede festgestellt. In

diesem Unterkapitel werden die erreichbaren Positionsergebnisse der drei verwendeten Smartphones in der statischen wie auch in der kinematischen Anwendung aufgezeigt und verglichen.

### 6.3.1 Statische Positionierung

Wie in Kapitel 5.1 werden mit den vier vorgestellten Methoden der Signalstärkeninvertierung, anhand der Scan's der 93 Rasterpunkte in vier Userorientierungen, die Positionen in einer kleinsten Quadrate-Schätzung bestimmt.

In Tabelle 6.5 ist die Anzahl der Rasterpunkte numerisch abgebildet, wie viele Access Points mit den jeweiligen Smartphones erfasst wurden. Hierbei ist deutlich erkennbar, dass mit dem Smartphone *HTC Desire X* in Summe die meisten AP an den Rasterpunkten empfangen wurden. Das *Samsung Ace* zeigt die geringste Anzahl an Access Points, wobei an 6 Rasterpunkten nur zwei Access Points erfasst wurden, was eine klare Standortbestimmung an diesen 6 Rasterpunkten unmöglich macht.

Tabelle 6.5: Häufigkeit der gescannten Access Points

| Anzahl AP      | 1 | 2 | 3  | 4  | 5   | 6   |
|----------------|---|---|----|----|-----|-----|
| Samsung Ace    | 0 | 6 | 22 | 52 | 189 | 103 |
| Samsung Galaxy | 0 | 2 | 20 | 50 | 168 | 132 |
| HTC Desire X   | 0 | 0 | 0  | 17 | 103 | 252 |

Das Kapitel 5.1 zeigte die Ergebnisse des Smartphones *HTC Desire X*, die einzelnen Graphiken der Längenabweichungen der Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy* sind im Anhang unter A.4 und A.5 ersichtlich. Im One-Slope-Modell zeigen sich im Hörsaal bereits gute Ergebnisse mit der Ausnahme des AP *CDEG-2*, die mittleren Längenabweichungen befinden sich bei 15,5 m mit dem Smartphone *Samsung Ace* und bei 10,6 m mit dem *Samsung Galaxy*. Im Multi-Wall-Modell zeigt das *Samsung Ace* extreme Längenabweichungen über die gesamte Rasterfläche, die größten Abweichungen befinden sich bei 729 m, siehe Abbildung A.20. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes ist bei allen drei verwendeten Smartphones erkennbar, dass im zentralen Bereich der drei Referenzstationen sehr gute Ergebnisse erzielt werden, mit geringen Längenabweichungen bis maximal 24,3 m. Am Rasterrand zeigen sich wie bereits bei *HTC Desire X*, markante Längenabweichungen. In der 2. Methode ist auch mit den restlichen beiden Smartphones eine sehr homogene Verteilung der Längenabweichungen erkennbar. Die maximalen Längendifferenzen befinden sich beim *Samsung Ace* in einer Größenordnung bei 43,2 m und beim *Samsung Galaxy* bei 33,8 m. Im Vergleich sind die mittlere Längenabweichung



deutlich geringer und befinden sich beim *Samsung Ace* bei 10,8 m und beim *Samsung Galaxy* bei 9,0 m.

Ebenfalls wird in den ersten drei Methoden die Adaption der dänischen Methode zur Gewichtung eingesetzt, um markante Abweichungen in den Beobachtungsdaten niedrig zu gewichten. Die 2. Methode des differenziellen Ansatzes wurde nur zu anschaulichen Zwecken in Tabelle 6.6 dargestellt. In dieser Methode zeigen sich bei allen drei Smartphones keine wesentlichen markanten Abweichungen in den Beobachtungsdaten, was keine unterschiedliche Gewichtung zur Folge hat. Aus diesem Grund wird bei dieser Variante der Signalstärkenkonvertierung von einer Gewichtung der Beobachtungen abgesehen. Die Abbildungen der Beobachtungsgewichtungen, jeweils in der 1. Userorientierung befinden sich im Anhang unter A.23 und A.35. Im Vergleich zu Tabelle 5.3, welche die Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen des Smartphones *HTC Desire X* wiedergibt, ist erkennbar, dass das Smartphone *Samsung Galaxy* und *HTC Desire X* etwa die gleiche Anzahl an niedrigen Beobachtungsgewichtungen aufweisen. Das *Samsung Ace* zeigt deutlich die geringste Anzahl an niedrig gewichteten Beobachtungen, dieses ist auf die höhere Standardabweichung in der Gewichtsfunktion zurückzuführen, siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 6.6: Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen

| Samsung Ace             | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
|-------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| One-Slope-Modell        | 22        | 18              | 115             | 1471      |
| Multi-Wall-Modell       | 27        | 14              | 83              | 953       |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 15        | 10              | 80              | 1408      |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 0               | 6               | 1648      |
| Samsung Galaxy          | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
| One-Slope-Modell        | 10        | 22              | 167             | 1628      |
| Multi-Wall-Modell       | 55        | 38              | 216             | 1359      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 5         | 19              | 99              | 1461      |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 1               | 13              | 1690      |

Tabelle 6.7 zeigt die Anzahl der bestimmten Userpositionen in den drei räumlichen Separationen. Im Vergleich zu Tabelle 5.4, die die Anzahl der bestimmten Positionen des Smartphones *HTC Desire X* dokumentiert, ist erkennbar, dass mit dem Smartphone *Samsung Ace* in allen Räumlichkeiten die wenigsten Userpositionen bestimmt wurden. Das *Samsung Galaxy* und das *HTC Desire X* zeigen eine ähnliche Anzahl an bestimmten Userpositionen, mit der Ausnahme des Multi-Wall-Modells, hier konnten mit dem *Samsung Galaxy* 34 Positionen weniger bestimmt werden.

Tabelle 6.7: Anzahl der bestimmten Positionen, der Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy*

|                         | Samsung Ace |     |       |     | Samsung Galaxy |     |       |     |
|-------------------------|-------------|-----|-------|-----|----------------|-----|-------|-----|
|                         | Gesamt      | Cb  | Foyer | Hs  | Gesamt         | Cb  | Foyer | Hs  |
| Gesamtanzahl            | 372         | 100 | 144   | 128 | 372            | 100 | 144   | 128 |
| One-Slope-Modell        | 332         | 100 | 105   | 127 | 365            | 100 | 137   | 128 |
| Multi-Wall-Modell       | 223         | 38  | 80    | 105 | 333            | 80  | 126   | 127 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 315         | 99  | 88    | 128 | 315            | 100 | 87    | 128 |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 368         | 100 | 141   | 127 | 368            | 100 | 141   | 127 |

Die beiden Abbildungen 6.16 und 6.17 zeigen die Ergebnisse der statischen Positionierung der beiden Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy*.

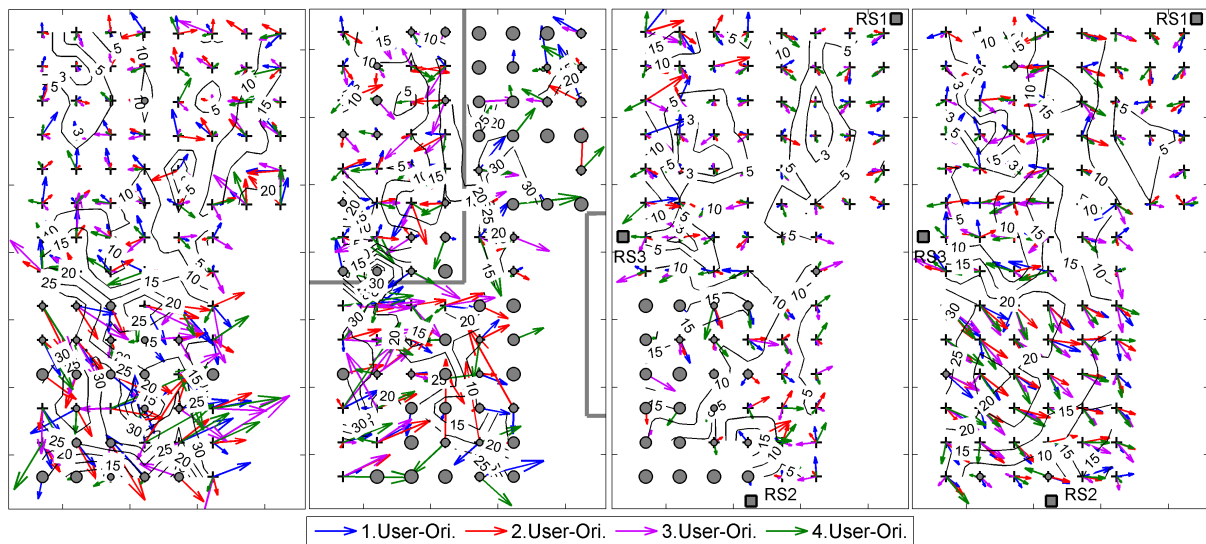


Abbildung 6.16: Positionierungsabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Ace* von links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

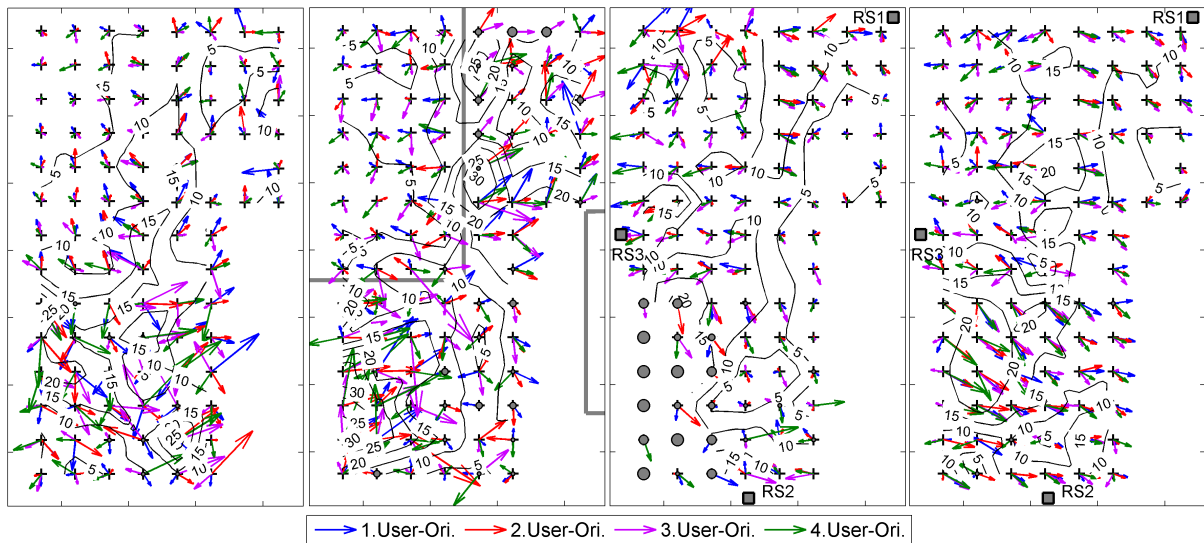


Abbildung 6.17: Positionnsabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Galaxy* von links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differentiellen Anstzes

Das Multi-Wall-Modell zeigt mit den beiden Smartphones keine wesentlichen Verbesserungen gegenüber dem One-Slope Modell bzw. konnten mit dem *Samsung Ace* 109 weitere Positionen nicht bestimmt werden. Im Allgemeinen zeigt das *Samsung Ace* die größten Positionsabweichungen. Im One-Slope-Modell bis 90 m und im Multi-Wall-Modell bis 104 m Unterschied zur Sollposition.

In der 1. Methode zeigen sich bei allen drei Smartphones Probleme in der Ausgleichung im linken unteren Bereich, da einzelne Distanzen eine gravierende Abweichung aufzeigen (bis 100 m) und in diesem Bereich nur wenige AP (2-3) erfasst werden. Im zentralen Bereich der drei Referenzstationen zeigen sich bei allen verwendeten Smartphones gute Ergebnisse und die mittleren Positionsabweichungen liegen bei 5 m. In der 2. Methode kann bei allen verwendeten Smartphones die höchste Anzahl an bestimmten Userpositionen berechnet werden. Die Positionsabweichungen liegen jedoch deutlich über der 1. Methode und im Foyer ist ein deutlicher Versatz der berechneten Positionen erkennbar.

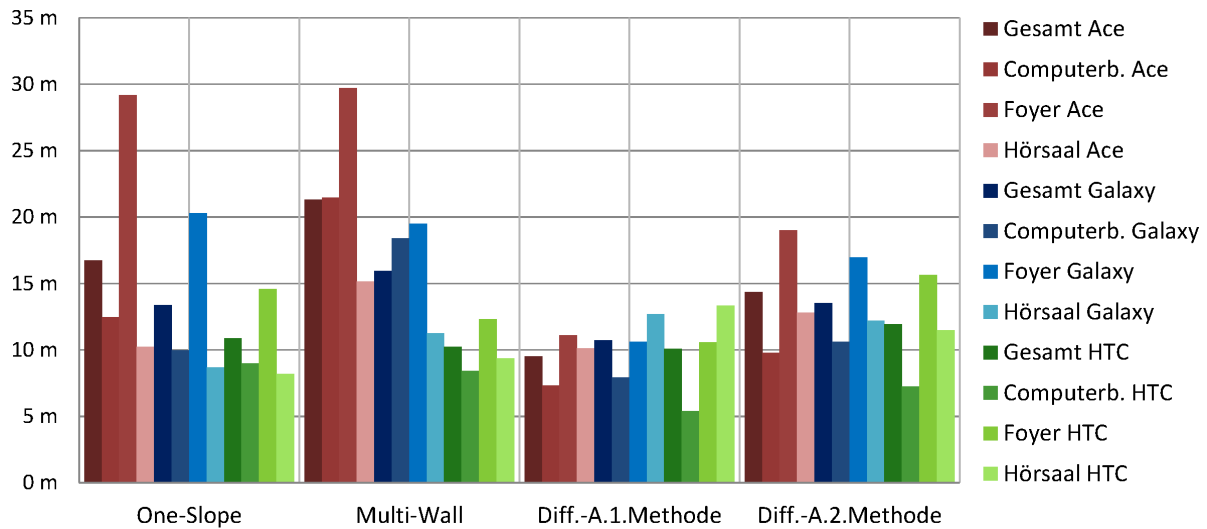


Abbildung 6.18: Vergleich der mittleren Positionsabweichung in der statischen Anwendung, mit den drei verwendeten Smartphones, *Samsung Ace* (rote Balken), *Samsung Galaxy* (blaue Balken), *HTC Desire X* (grüne Balken)

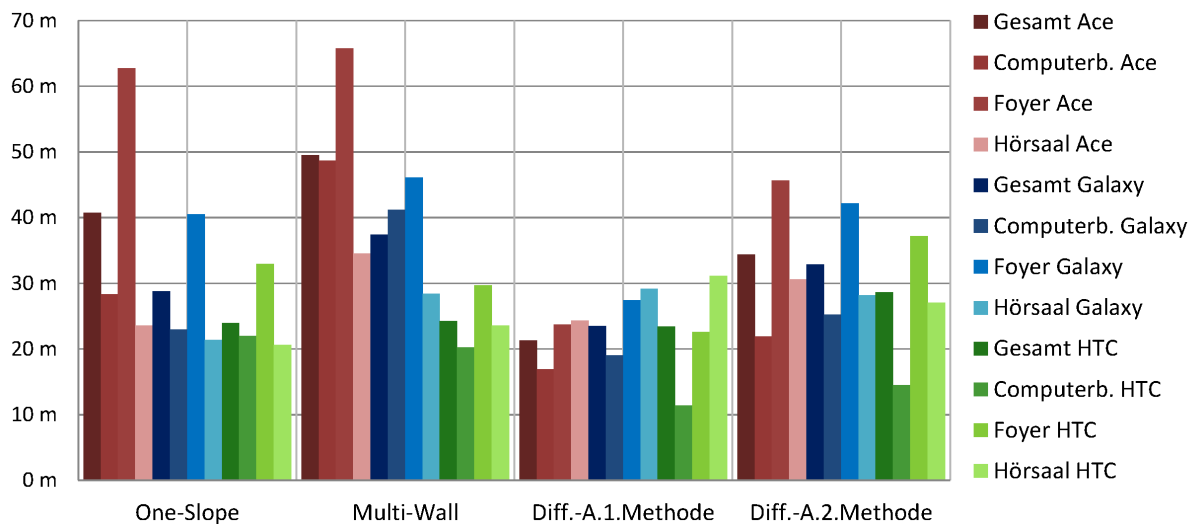


Abbildung 6.19: Vergleich der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse in der statischen Anwendung, mit den drei verwendeten Smartphones, *Samsung Ace* (rote Balken), *Samsung Galaxy* (blaue Balken), *HTC Desire X* (grüne Balken)

In der direkten Gegenüberstellung mittels der Balkendiagramme in Abbildung 6.18 und 6.19, wurden die mittleren Positionsabweichungen und die große Halbachse als Vergleichsparameter herangezogen. Die verwendeten drei Smartphones sind durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet. Ebenfalls wurden die räumlichen Separationen miteinbezogen, hier sind markante Unterschiede erkennbar, wobei im Foyer mit allen verwendeten Smartphones und Signalinvertierungsmethoden die deutlichsten schlechtesten Ergebnisse erzielt wurden. Wie bereits erwähnt, bewirken in dieser Umgebung vorhandene physikalischen

Objekte signifikante Dämpfungseffekte des WLAN-Signal, welche sich sehr negativ auf die Positionierung mittels Trialiteration auswirken.

Im Vergleich der drei Smartphones ist erkennbar, dass das *Samsung Ace* die größten Abweichungen im Multi-Wall und One-Slope-Modell aufweist. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten können hier sehr deutliche Verbesserungen erzielt werden. Die mittleren Positionsabweichungen konnten von 17,2 m auf 9,6 in der 1. Methode und auf 14,4 m in der 2. Methode des differenziellen Ansatzes gesenkt werden.

Es ist auch bei allen drei Smartphones erkennbar, dass die 1. Methode gegenüber der 2. Methode deutlich bessere Ergebnisse in der statischen Positionierung liefert, es muss aber berücksichtigt werden, dass hier deutlich weniger Userpositionen bestimmt wurden.

### 6.3.2 Kinematische Positionierung

Durch die Smartphone-Applikation des WiFi-Recorders wurden mit den drei verwendeten Smartphones entlang der vordefinierten Trajektorie Signalstärkenscans durchgeführt, um die Bewegung des User zu bestimmen, siehe Abbildung 4.3.

Im Allgemeinen benötigten die zwei User der Smartphones *HTC Desire X* und *Samsung Galaxy* für die 114,0 m lange Trajektorie dieselbe Zeitdauer, wobei der User des *Samsung Ace* die Trajektorie um 20 sec schneller absolvierte. Mit der verwendeten Applikation ergaben sich im Scanintervall sehr unterschiedliche Zeitabstände, was zu einer unterschiedlichen Scananzahl führte, siehe Tabellen 6.8. In dieser Tabelle ist ebenfalls die Access Point Anzahl der Scans dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass mit dem Smartphones *HTC Desire X*, entlang der Trajektorie bei den gesamten Scans alle 6 AP erfasst wurden.

Tabelle 6.8: Häufigkeit der gescannten Access Points in der kinematischen Anwendung

| Anzahl AP      | 3 | 4 | 5  | 6   | Scananzahl | Zeit[sec] |
|----------------|---|---|----|-----|------------|-----------|
| Samsung Ace    | 0 | 2 | 76 | 239 | 317        | 128       |
| Samsung Galaxy | 0 | 1 | 11 | 30  | 42         | 147       |
| HTC Desire X   | 0 | 0 | 0  | 101 | 101        | 148       |

Die Abbildungen der Distanzabweichungen mit den jeweiligen Histogrammen der kinematischen Scans befinden sich im Anhang unter A.4.2 und A.5.2. Hierbei ist ersichtlich, dass mit dem Smartphone *Samsung Galaxy* mit dem One-Slope-Modell durchaus gute Ergebnisse erzielt werden, die größten Abweichungen befinden sich in einer Größenordnung von 46,8 m, siehe Abbildung A.37. Das Multi-Wall-Modell zeigt mit dem *Samsung Ace* sehr fehlerhafte Längenberechnungen mit Abweichungen bis 1064 m, siehe Abbildung A.26. Dies ist auf sehr geringe Signalstärken und auf die flach auslaufende logarithmische

Distanzfunktion zurückzuführen. Wie bereits im statischen Fall, weist die 1. Methode des differenziellen Ansatzes im zentralen Bereich der drei Referenzstationen die besten Ergebnisse der Signalinvertierung auf. Hier befinden sich die größten Abweichungen mit dem *Samsung Ace* bei 15,6 m und mit dem *Samsung Galaxy* bei 12,8 m. Die 2. Methode des differenziellen Ansatzes zeigt bei allen drei verwendeten Smartphones keine markanten Längenabweichungen, die größten befinden sich bei 53,3 m mit dem *Samsung Ace* und bei 63,1 m mit dem *Samsung Galaxy*.

In Tabelle 6.9 wurde der Mittelwert und Median der absoluten Längenabweichungen, sowie die dazugehörige Standardabweichung der beiden Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy* numerisch aufgelistet. Im Vergleich zu Tabelle 5.6, die das Smartphone *HTC Desire X* wiedergibt, ist erkennbar, dass das *HTC Desire X* die besten Ergebnisse der Längenberechnung in allen 4 Methoden der Signalstärkeninvertierung erzielt. Bei allen 4 Methoden ist der Median gegenüber dem Mittelwert deutlich geringer, dies lässt auf Ausreißer in den Daten schließen, was auch in den Histogrammen der Längenabweichungen gut beobachtet werden kann, siehe Abbildung A.39.

Tabelle 6.9: Längenabweichungen in der kinematischen Positionierung, der Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy*

| $\Delta L[m]$           | Samsung Ace |        |        | Samsung Galaxy |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|                         | Mittel      | Median | $s_L$  | Mittel         | Median | s      |
| One-Slope-Modell        | 13,773      | 10,128 | 18,270 | 9,429          | 7,204  | 12,133 |
| Multi-Wall-Modell       | 43,069      | 17,030 | 93,825 | 20,243         | 9,621  | 31,181 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 12,227      | 8,404  | 17,308 | 12,604         | 7,515  | 18,439 |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 12,863      | 11,579 | 15,589 | 11,110         | 8,416  | 14,884 |

Wie im statischen Fall wurde im kleinsten Quadrate-Ausgleich eine Adaption der dänischen Methode zur Gewichtung der Beobachtungsdaten verwendet. Die Tabelle 6.10 zeigt die Anzahl der gewichteten Längenbeobachtungen. Die graphischen Abbildungen der unterschiedlichen Gewichtungen sind im Anhang unter A.29 und A.41 ersichtlich. Hierbei ist bei allen drei verwendeten Smartphones erkennbar, dass in der 2. Methode des differenziellen Ansatzes eine sehr geringe Anzahl an niedrig gewichteten Beobachtungen stattfindet.

Tabelle 6.10: Häufigkeit der Beobachtungsgewichtungen

| Samsung Ace             | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
|-------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| One-Slope-Modell        | 12        | 16              | 99              | 1733      |
| Multi-Wall-Modell       | 28        | 23              | 61              | 1094      |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 25        | 28              | 115             | 1572      |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 0               | 19              | 1865      |
| Samsung Galaxy          | $p < 0,1$ | $0,1 < p < 0,5$ | $0,5 < p < 0,9$ | $0,9 < p$ |
| One-Slope-Modell        | 1         | 3               | 21              | 227       |
| Multi-Wall-Modell       | 10        | 3               | 19              | 160       |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 5         | 10              | 9               | 192       |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 0         | 1               | 5               | 246       |

Tabelle 6.11 zeigt die Anzahl der bestimmten Userpositionen in der kinematischen Anwendung der beiden Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy*. Im Vergleich zu Tabelle 5.10, die die Anzahl der bestimmten Userpositionen des Smartphones *HTC Desire X* wiedergibt, ist erkennbar, dass mit dem *Samsung Ace* die meisten unbestimmten Userpositionen auftreten. Ebenfalls ist deutlich sichtbar, dass mit *HTC Desire X* die meisten Positionen in der kinematischen Anwendung bestimmt werden konnten.

Tabelle 6.11: Anzahl der bestimmten Positionen der Smartphones *Samsung Ace* und *Samsung Galaxy*

|                         | Samsung Ace |    |       |     | Samsung Galaxy |    |       |    |
|-------------------------|-------------|----|-------|-----|----------------|----|-------|----|
|                         | Gesamt      | Cb | Foyer | Hs  | Gesamt         | Cb | Foyer | Hs |
| Gesamtanzahl            | 317         | 98 | 92    | 127 | 42             | 13 | 12    | 17 |
| One-Slope-Modell        | 310         | 97 | 86    | 127 | 42             | 13 | 12    | 17 |
| Multi-Wall-Modell       | 200         | 55 | 68    | 77  | 32             | 6  | 10    | 16 |
| Diff. Ansatz 1. Methode | 289         | 98 | 68    | 124 | 36             | 13 | 7     | 16 |
| Diff. Ansatz 2. Methode | 314         | 95 | 92    | 127 | 42             | 13 | 12    | 17 |

In den beiden Abbildungen 6.20 und 6.21 sind die berechneten Userpositionen als Vektoren entlang der vordefinierten Trajektorie dargestellt. Zur Übersichtlichkeit wurden die Fehlervektoren mit einem Faktor von 0,2 skaliert und sind in unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

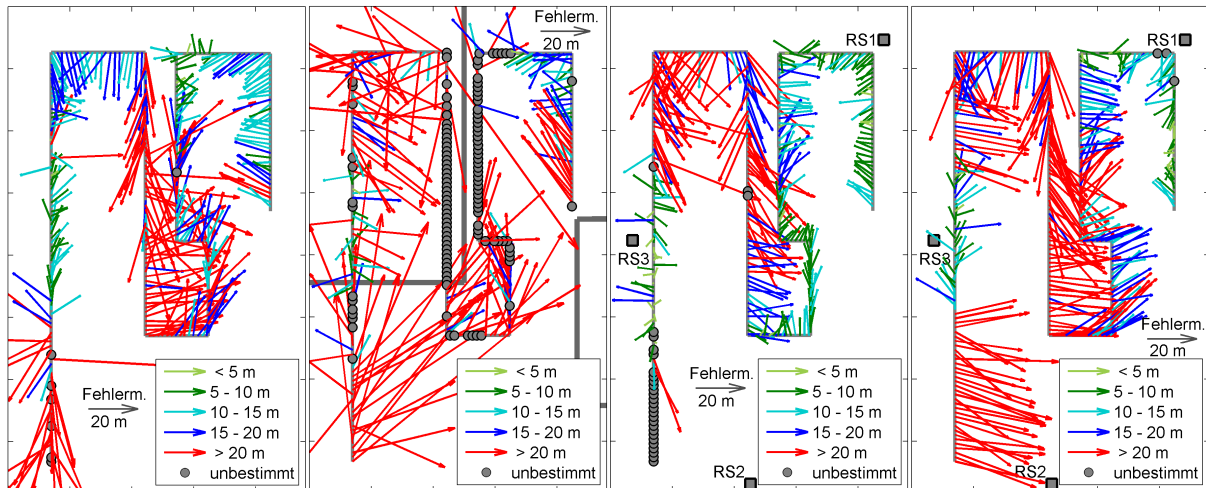


Abbildung 6.20: Positionnsabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Ace* in der kinematischen Anwendung, von links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

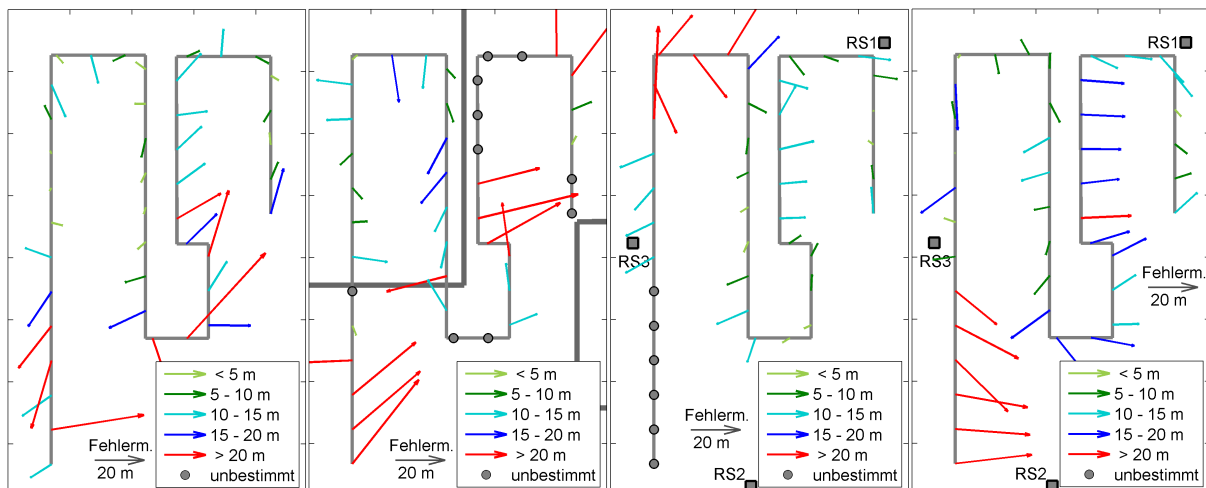


Abbildung 6.21: Positionnsabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Galaxy* in der kinematischen Anwendung, von links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differenziellen Ansatzes

Im One-Slope-Modell konnten im Hörsaal, linker oberer Abschnitt der Trajektorie, die besten Ergebnisse bei allen verwendeten Smartphones erzielt werden. Wie bereits in der Tabelle 6.11 erkennbar, konnten im Multi-Wall-Modell mit dem Smartphone *Samsung Ace* 117 Positionen nicht bestimmt werden. Die besten Ergebnisse des Multi-Wall-Modells in der kinematischen Anwendung zeigte das Smartphone *HTC Desire X*, siehe Abbildung 5.15. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes zeigen sich am Trajektorienstart (in Abbildung, links unten) mit den beiden *Samsung* Geräten, dass keine Positionen bestimmt werden konnten. Auch in der statischen Anwendung zeigte sich in diesem Bereich,



dass keine Positionsbestimmung möglich war. In der 2. Methode ist mit allen drei verwendeten Smartphones die maximale Anzahl an Positionen bestimmt worden. Wobei am Trajektorienstart große Positionsabweichungen über 20 m mit den beiden *Samsung* Geräte vorkommen.

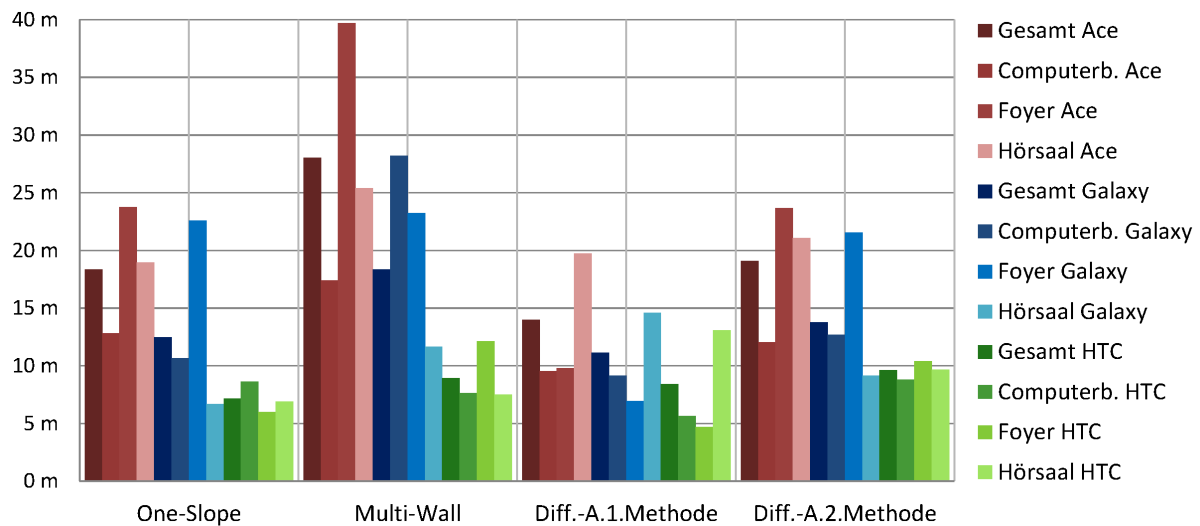


Abbildung 6.22: Vergleich der mittleren Positionsabweichung in der kinematischen Anwendung, mit den drei verwendeten Smartphones, *Samsung Ace* (rote Balken), *Samsung Galaxy* (blaue Balken), *HTC Desire X* (grüne Balken)

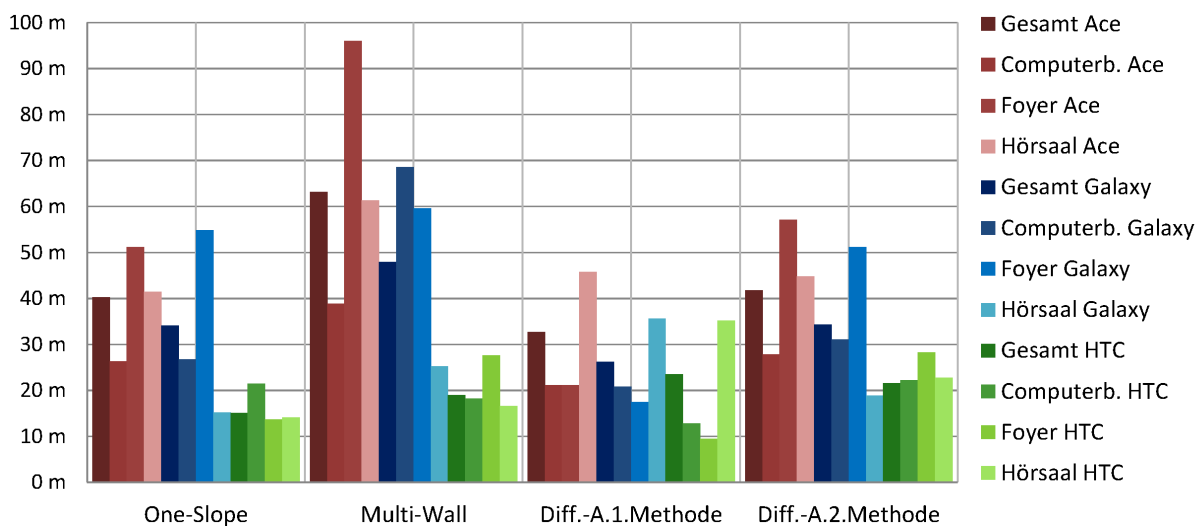


Abbildung 6.23: Vergleich der großen Halbachse der 95 % Konfidenzellipse in der kinematischen Anwendung, mit den drei verwendeten Smartphones, *Samsung Ace* (rote Balken), *Samsung Galaxy* (blaue Balken), *HTC Desire X* (grüne Balken)

In der direkten Gegenüberstellung mit Balkendiagrammen in Abbildung 6.22 und 6.23 sind die Unterschiede in der kinematischen Positionierung deutlich erkennbar. Wie bereits

im statischen Fall wurden die mittleren Positionsabweichungen und die große Halbachse als Vergleichsparameter herangezogen. Im Vergleich der drei Smartphones zeigt das *Samsung Ace* die größten Abweichungen bei allen 4 Signalstärkeninvertierungen. Mit diesem Smartphone konnten im Multi-Wall-Modell gegenüber dem One-Slope-Modell keine Verbesserungen erzielt werden und die mittleren Positionsabweichungen haben sich um 9,7 m erhöht. In der 1. Methode zeigen sich im Balkendiagramm Verbesserungen gegenüber dem One-Slop-Modell. Es muss aber berücksichtigt werden, dass 21 Positionen weniger bestimmt werden konnten. Die 2. Methode zeigt ein identes Bild der mittleren Positionsabweichungen.

Das Smartphone *Samsung Galaxy* zeigt bereits gute Ergebnisse im One-Slope-Modell im Computerbereich und Hörsaal. Hier liegen die mittleren Positionsabweichungen bei 10,7 und 6,7 m. Wie bei allen drei Smartphones konnte auch mit dem *Samsung Galaxy* keine Verbesserung im Multi-Wall-Modell erzielt werden. In der 1. Methode zeigt sich insgesamt eine Verbesserung der mittleren Positionsabweichungen um 1,3 m, wobei diese aber im Hörsaal um 7,9 m gestiegen sind. Wie bereits mit dem *Samsung Ace* zeigt sich auch mit dem *Samsung Galaxy* ein sehr ähnliches Bild der mittleren Positionsabweichungen, gegenüber dem One-Slope-Modell.

Durch die räumlichen Separationen sind markante Unterschiede in der kinematischen Positionsbestimmung sichtbar. Bei allen verwendeten Smartphones zeigten sich im One-Slope-Modell die besten Ergebnisse im Hörsaal. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten treten, mit der Ausnahme des *HTC Desire X* im linken unteren Bereich, eine Mehrzahl an unbestimmten Positionen auf. In der 2. Methode des differenziellen Ansatzes konnten hingegen die meisten Positionen bestimmt werden, wobei die mittleren Positionsabweichungen bei allen drei verwendeten Smartphones leicht gestiegen ist.

### **Zusammenfassung**

Im Vergleich der Ausgleichsart konnten keine gravierenden Unterschiede zwischen dem kleinsten Quadrate-Ausgleich und der robusten Schätzmethode festgestellt werden, obwohl in den Beobachtungen große Variationen und Abweichungen zur Normalverteilung vorkommen. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass im kleinsten Quadrate-Ausgleich eine Abart der dänischen Methode zur Gewichtung der markanten Beobachtungsfehler eingesetzt wird. Im Allgemeinen zeigte die Least-Median-Square-Schätzung eine geringfügige Verschlechterung in der statischen, als auch in der kinematischen Positionierung.

Die Analyse der Auswahl des Standortes der Referenzstation lässt zwei konkrete Aussagen zu. Zum einen konnte gezeigt werden, dass in beiden differenziellen Ansätzen bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn sich die Referenzstationen unter den Access Points befinden. Zum anderen wurde in der 1. Methode des differenziellen Ansatzes ein deutlicher

Zusammenhang zwischen Positionierungsfehler und dem Abstand zwischen User und Referenzstation festgestellt. Die Positionsabweichung wächst mit zunehmenden Abstand zur Referenzstation, wobei dieser Trend in der 2. Methode des differenziellen Ansatzes deutlich schwächer ausgeprägt ist.

Im Vergleich der verwendeten drei Smartphones, konnten sehr unterschiedliche Ergebnisse festgestellt werden. In der statischen Positionierung zeigen sich im One-Slope-Modell bei den Smartphones *Samsung Galaxy* und *HTC Desire X* deutlich bessere Ergebnisse als beim *Samsung Ace*. Im Multi-Wall-Modell konnten keine Verbesserungen in der Positionierung erzielt werden, mit der geringen Ausnahme des Smartphone *HTC Desire X*. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten zeigen alle verwendeten Smartphones in den beiden differenziellen Methoden ein sehr ähnliches Ergebnis in der statischen Positionierung. In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes konnten im linken unteren Rasterbereich des Messgebietes einige Positionen nicht bestimmt werden. In der 2. Methode werden die meisten Positionen bestimmt, wobei im Vergleich zum One-Slope-Modell mit dem *Samsung Ace* eine deutliche Verbesserung, mit *Samsung Galaxy* eine geringe Verbesserung und mit dem *HTC Desire X* eine geringe Verschlechterung der statischen Positionierung eingetreten ist.

In der kinematischen Auswertung konnte zu Beginn ein sehr unterschiedliches Scanintervall der verwendeten drei Smartphones festgestellt werden. Im Vergleich der Positionierungsergebnisse ist das *HTC Desire X*, bei allen 4 Varianten der Signalstärkeninvertierung, deutlich im Vorteil gegenüber den beiden *Samsung* Geräten. In weiterer Folge zeigen die beiden *Samsung* Smartphones im Multi-Wall-Modell gravierende Abweichungen der berechneten Positionen und zusätzlich konnte eine Vielzahl an Positionen nicht bestimmt werden. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten zeigte sich bei allen drei Smartphones ein sehr markanter räumlicher Unterschied im Ergebnis der kinematischen Positionierung. Im Hörsaal konnte gegenüber dem One-Slope-Modell eine Verschlechterung und im Computerbereich eine Verbesserung der Positionsbestimmung aufgezeigt werden.

## 7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein Indoor-Positionierungssystem zu entwickeln, unter Verwendung von WLAN-Signalstärken auf Basis der Trilateration. Die Indoor-Positionierung hat sehr an Bedeutung gewonnen, da GNSS in Gebäuden eine begrenzte Verfügbarkeit bietet. Der große Vorteil gegenüber den anderen Technologien (RFID, Bluetooth, etc.) ist, dass in vielen öffentlichen Gebäuden, in denen die Positionierung von großem Interesse ist, die benötigte Infrastruktur bereits vorhanden ist. Erstmals sollen die aufgezeichneten WLAN-Signale der Smartphones durch den permanenten Scan von Referenzstationen verbessert werden.

In den praktischen Anwendungen, welche im Foyer und Hörsaal VII des Elektrotechnischen Institutsgebäudes der TU Wien in der Gußhausstraße 27-29 gemacht wurden, kamen Raspberry Pi's als Referenzstationen zur Anwendung. Insgesamt wurden kinematische und statische Signalstärkenscans mit drei unterschiedlichen Smartphones durchgeführt. Die Langzeitbeobachtungen der Referenzstationen zeigten große zeitliche Variation in den Daten und nach bereits 5 Minuten eine Änderung der Signalstärke von 30 %, was grundsätzlich in der Positionsbestimmung mit WLAN-Signalstärken eine große Herausforderung darstellt. In einer weiteren Voruntersuchung wurde der Einfluss der Userorientierung näher analysiert. Hierbei zeigte sich ebenfalls ein großes Signalrauschen, wobei ein klarer Trend der Signalschwächung durch die Abschattung des Users nicht erkennbar war. Es zeigte sich aber die Tatsache, wenn sich der User zwischen AP und Smartphone befindet, dass bei schwachen WLAN-Signalen ein Signalausfall eintritt.

In Summe wurden vier Varianten der Konvertierung der WLAN-Signalstärke in Distanzen zu den Access Points präsentiert. In der ersten Variante, dem One-Slope-Modell wird der Zusammenhang zwischen Länge und empfangener Signalstärke mittels einer logarithmischen Funktion hergestellt. Im Multi-Wall-Modell werden zusätzlich Dämpfungseffekte der Wände modelliert und berücksichtigt. In den beiden neuartigen differenziellen Methoden werden durch die Verwendung von Referenzstationsdaten zeitliche Variationen in den WLAN-Signalstärken minimiert. In den Voruntersuchungen wurden diese Modelle empirisch angewendet um einen Zusammenhang der Länge zwischen User und Access Points zu erhalten. Hierbei zeigten sich große Variationen und vor allem die auftretende

Dämpfung der Signale erzeugt systematische Abweichungen. Hier konnten durch die Hinzunahme der Referenzstationen keine wesentlichen Verbesserungen erreicht werden und die abgeleiteten Längen zeigen im besten Fall eine Standardabweichung von 10 m. Der Median ist gegenüber der mittleren Längenabweichung deutlich geringer (5 m), was auf markante einzelne Abweichungen in den Daten zurückzuführen ist, da durch die flach auslaufende logarithmische Distanzfunktion extreme Längenabweichungen zustande kommen. Durch die Annahme des linearen Zusammenhangs im 2. differenziellen Modell konnte eine Normalverteilung der Längenabweichungen erzeugt werden, wobei die mittleren Längenabweichungen, im Vergleich zur 1. Methode des differenziellen Ansatzes, nicht gesenkt werden konnten.

Die Positionsbestimmung mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gilt grundsätzlich als problematisch, da diese nicht robust ist. Aus diesem Grund wurde zur Elimination der markanten Längenabweichungen eine Adaption der dänischen Methode verwendet, bei welcher große Verbesserungen in einen iterativen Prozess niedrig gewichtet werden. Hier präsentierten sich in den logarithmischen Signalstärkenmodellen gute Charakteristiken, um systematische Abweichungen schnell und automatisch auszuschalten. Die robuste Schätzung mittels Least-Median-Square zeigte im Vergleich der kleinsten Quadrate-Schätzung keine wesentlichen Verbesserungen in der statischen und kinematischen Positionierung.

In der statischen Positionierung konnte mittels der WLAN-Signalstärkentrilateration ohne Referenzdaten, bei guten räumlichen Bedingungen, eine mittlere Positionsabweichung von 8,2 m erreicht werden. Das Multi-Wall-Modell zeigte bei einigen Gebieten und mit dem Smartphone *HTC Desire X* eine geringfügige Verbesserung, aber alles in allem kann festgehalten werden, dass gegenüber dem One-Slope-Modell in der statischen Anwendung eine geringe Verbesserung und in der kinematischen Anwendung eine geringfügige Verschlechterung der Positionierung eintrat. Es müssen aber zusätzliche Parameter (Dämpfungswerte der einzelnen Wände) bekannt sein, was bei komplizierten Räumlichkeiten zu einem komplexen Problem werden kann.

In der 1. Methode des differenziellen Ansatzes konnten im zentralen Bereich der Referenzstationen durchaus gute Ergebnisse der Positionierung und Verbesserungen aufgezeigt werden. Die geringsten Abweichungen liegen in einer Größenordnung von 3 m. Die Positionsabweichungen in der 2. Methode sind deutlich höher und befinden sich bei guten Bedingungen bei 5 m. Es zeigen sich aber markante Unterschiede in den Räumlichkeiten bei allen vier Varianten, da durch physikalische Dämpfungseffekte gravierende Einflüsse auf die Signalstärke und somit auch auf die Positionierung mittels der Trilateration ausgeübt werden.

In der kinematischen Anwendung zeigten sich auch sehr gravierende Unterschiede in den

Ergebnissen der einzelnen Smartphones. Die besten Ergebnisse wurden mit dem Smartphone *HTC Desire X* erzielt und die mittleren Abweichungen des One-Slope-Modells liegen im Bereich von 7,2 m. In der 1. Methode des differentiellen Ansatzes zeigten sich markante räumliche Unterschiede. Hier konnte im Hörsaal eine Verschlechterung und im Computerbereich und Foyer eine Verbesserung gegenüber dem One-Slope-Modell aufgezeigt werden.

Durch die Analyse der Auswahl des Standortes der Referenzstation konnte gezeigt werden, dass in der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, ein deutlicher Zusammenhang zwischen Positionierungsfehler und dem Abstand zwischen User und Referenzstation besteht. Die Positionsabweichung wächst mit zunehmendem Abstand zur Referenzstation, wobei dieser Trend in der 2. Methode deutlich schwächer ausgeprägt ist. Durch eine höhere Anzahl an Referenzstationen und der Verkürzung des Abstandes zwischen diesen, wäre eine Steigerung der Positionsgenauigkeit in der 1. Methode erreichbar.

Als Resümee kann festgehalten werden, dass in großen, freien Räumen das One-Slope-Modell ohne Referenzstationen durchaus gute Ergebnisse in der statischen, wie auch in der kinematischen Positionierung liefert. Bei auftretender Dämpfung der Signale durch physikalische Objekte zeigte die Verwendung von Referenzstationsdaten durchaus wesentliche Verbesserungen in der Positionierung des Smartphone-Users.

Auf dem Gebiet der Indoor-Positionierung mittels WLAN-Signalstärken ist noch sehr viel zukünftiges Forschungspotential vorhanden. In dieser Arbeit wurde der Trilaterationsansatz durch die Hinzunahme von Referenzstationsdaten erweitert. Im Fingerprinting wäre ebenso eine Verwendung von Referenzstationsdaten denkbar, bzw. wäre eine Kombination von Fingerprinting und der Trilateration vorstellbar. Die dynamische Änderung der WLAN-Signale könnte auch im Ray Tracing durch die Verwendung von Referenzstationen berücksichtigt werden, um eine zeitliche Variation in den Signalstärkekarten zu erhalten. Ein spannendes Thema ist auch die integrierte Navigationslösung aller Sensordaten des Smartphones. Durch eine Sensorfusionierung könnten einerseits große Scanintervalle überbrückt und andererseits die Drift der Bewegungssensoren korrigiert werden.

In der Realität zeigen sich räumliche und zeitliche Signalstärken-Schwankungen, die die Positionierung zu einer komplexen Thematik werden lässt. Hierbei sollten ausführliche Analysen die möglichen Ursachen klären, um eventuell weitere Parameter in Ausbreitungsmodelle miteinzubeziehen und die Positionsbestimmung dadurch zu verbessern. Inwieweit es sinnvoll ist, Dämpfungseffekte der Umgebung miteinzubeziehen, ist fraglich, ebenso die Ausrichtung des Smartphone-Users oder die WLAN-Antennenausrichtung. Ein weiterer Punkt wäre die Untersuchung, inwieweit persönliche Hotspots für die Messungen zwischen Usern nutzbar sind und in welchem Ausmaß eine gemeinsamen Positionierung einer ganzen Personengruppe zu bewerkstelligen ist.

---

# Abkürzungsverzeichnis

**AOA** Angle of Arrival

**AP** Access Point

**BSS** Basic Service Set

**BSSID** Basic Service Set Identifier

**COO** Cell of Origin

**EIRP** Equivalent Isotropically Radiated Power

**ESS** Extended Service Set

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**GSM** Global System for Mobile Communication

**IMU** Inertial Measurement Unit

**LBS** Location Based Service

**LMS** Least Median Square

**LOP** Line of Position

**LOS** Line of Sight

**LSA** Least Square Adjustment

**MAC** Media Access Control

**NLOS** Non Line of Sight

**RFID** Radio Frequency Identification

**RS** Referenzstation

**RSSI** Received Signal Strength Indicator

**SOP** Surface of Position

**SSID** Service Set Identifiers

**TDOA** Time Differences of Arrival

**TOA** Time of Arrival

**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System

**WLAN** Wireless Local Area Network





---

# Literaturverzeichnis

- Aveneau, L., Masson, E., und Combeau, P., 2010. *RaPSor: a Radio Propagation Simulator, Presentation and Use Cases*. Product Presentation. Online im Internet: [http://www.researchgate.net/publication/228735225\\_RaPSor\\_a\\_Radio\\_Propagation\\_Simulator\\_Presentation\\_and\\_Use\\_Cases](http://www.researchgate.net/publication/228735225_RaPSor_a_Radio_Propagation_Simulator_Presentation_and_Use_Cases). aufgerufen am: 28.10.2015.
- Bai, Y. B., Wu, S., Retscher, G., Kealy, A., Holden, L., Tomko, M., Borriak, A., Hu, B., Wu, H. R., und Zhang, K., 2014. *A new method for improving Wi-Fi-based indoor positioning accuracy*. Journal of Location Based Services, Vol. 7, No. 2, pp. 135-147. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17489725.2014.977362>.
- Bardwell, J., 2002. *Converting Signal Strength Percentage to dBm Values*. Wild-Packets, Inc. Online im Internet: [http://penguin.ewu.edu/cscd433/802.11-Converting\\_Signal\\_Strength-10-2012.pdf](http://penguin.ewu.edu/cscd433/802.11-Converting_Signal_Strength-10-2012.pdf). aufgerufen am: 06.05.2015.
- Chang, N., Rashidzadeh, R., und Ahmadi, M., 2010. *Robust Indoor Positioning using Differential Wi-Fi Access Points*. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 56, No. 3, pp. 1860 - 1867. DOI: 10.1109/TCE.2010.5606338.
- Dornbusch, P. und Zündt, M., 2002. *Realisierung von Positionsortung in WLAN*. ITG-Fachtagung "Technologie und Anwendung für die mobile Informationsgesellschaft".
- Favre-Bulle, P., 2015. *Design and Implementation of an Adaptive Indoor Positioning System based on Received and Interpolated Signal Strengths*. Master's thesis, Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien.
- Grejner-Brzezinska, D. A. und Toth, C., 2013. *GPS-Challenged Environments: Can Collaborative Navigation help?* Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation. Series A, Vol. 45, No. 3, pp. 211 - 218.
- Hofer, H., 2015. *Kombinierte Indoor/Outdoor Positionierung mit Smartphones*. Diplomarbeit, Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien.
- Hofman-Wellenhof, B., Legat, K., und Wieser, M., 2011. *Navigation - Principles of Positioning and Guidance*. Springer Science & Business Media, Wien - New York.
- Kaemarungsi, K. und Krishnamurthy, P., 2004. *Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting*. Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on, pp. 14-23. DOI: 10.1109/MOBIQ.2004.1331706.
- Kogelnig, C., 2012. *Möglichkeiten und Methoden zur räumlichen Visualisierung von WLAN-Netzwerken mittels GIS-gestützter Analyseverfahren*. Diplomarbeit, Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie der Universität Wien.

- 
- Lee, J. K., Grejner-Brzezinska, D. A., und Charles, T., 2012. *Network-based Collaborative Navigation in GPS-Denied Environment*. The Journal of Navigation (2012), 65, pp. 445-457, The Royal Institute of Navigation. DOI: 10.1017/S0373463312000069.
- Liu, H.-H. und Yang, Y.-N., 2011. *WiFi-Based Indoor Positioning for Multi-Floor Environment*. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, IEEE Vol. 72, No. 4, pp. 597-601. DOI: 10.1109/TENCON.2011.6129175.
- Luntovskyy, A., Gütter, D., und Melnyk, I., 2012. *Planung und Optimierung von Rechnernetzen*. Springer Science & Business Media.
- Metter, M. und Bucher, R., 2007. *Industrial Ethernet in der Automatisierungstechnik: Planung und Einsatz von Ethernet-LAN-Techniken im Umfeld von SIMATIC-Produkten*. Publicis Corporate Publishing, 2. Auflage, Erlangen.
- Moghtadaiee, V. und Dempster, A., 2015. *Vector Distance Measure Comparison in Indoor Location Fingerprinting*. International Global Navigation Satellite System Society, IGNSS Symposium, Australia.
- Mok, E. und Retscher, G., 2007. *Location determination using WiFi fingerprinting versus WiFi trilateration*. Journal of Location Based Service, Vol. 1, No. 2, pp. 145-159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080.17489720701781905>.
- Niemeier, W., 2008. *Ausgleichungsrechnung, Statistische Auswertemethoden*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2. Auflage, Berlin.
- Ramlow, S. und Peterhanwahr, J., 2008. *Industrial Wireless*. Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co. KG, 1. Auflage, Konstanz.
- Retscher, G., Zhang, K., und Zhu, M., 2012. *RFID Positioning. Chapter 4 in: Chen R. (Ed.): Ubiquitous Positioning and Mobile Location-Based Services in Smart Phones*. IGI Global, Hershey PA, USA, pp. 69-95, ISBN:978-1-4666-1827-5. DOI: 10.4018/978-1-4666-1827-5.ch004.
- Schuh, W.-D., 1984. *Rasche und einfache automatische Fehlererkennung bei großen Datenmengen*. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Vol. 72, No. 4, S. 137-147.
- Shchekotov, M., 2008. *Indoor Localization Method Based on Wi-Fi Trilateration Technique*. Proceeding of the 16th Conference of fruct Association, pp. 177-179.
- Vossiek, M. und Wiebking, L., 2003. *Wireless Local Positioning - Concepts, Solutions, Applications*. Radio and Wireless Conference, 2003. RAWCON'03. Proceedings, IEEE, pp. 219-224. DOI: 10.1109/RAWCON.2003.1227932.
- Yang, J. und Chen, Y., 2009. *Indoor Localization Using Improved RSS-Based Lateration Methods*. Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2009. IEEE. DOI: 10.1109/GLOCOM.2009.5425237.

---

# A Anhang

## A.1 Graphiken Raspberry Zeitreihen

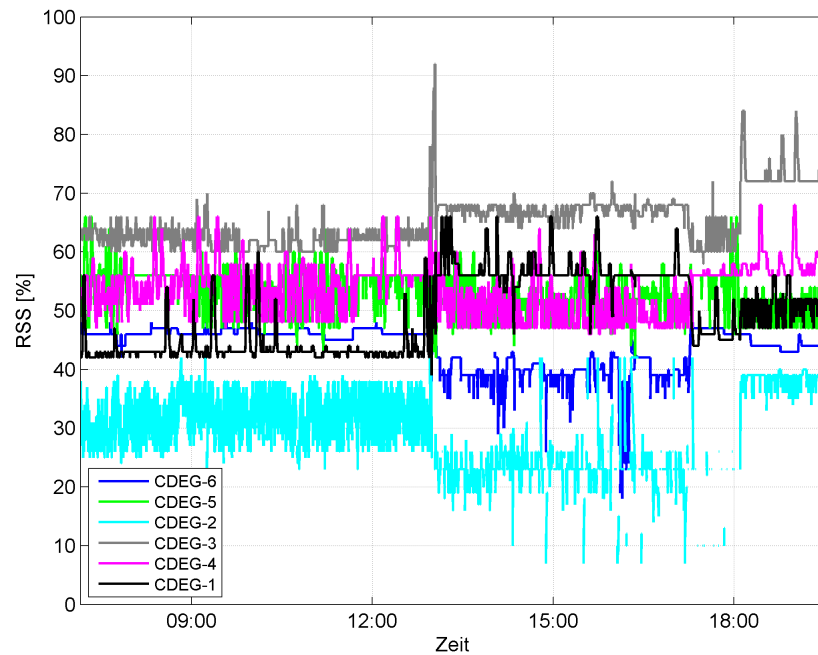


Abbildung A.1: Zeitreihe der Signalstärke über den ersten Messtag an RS1

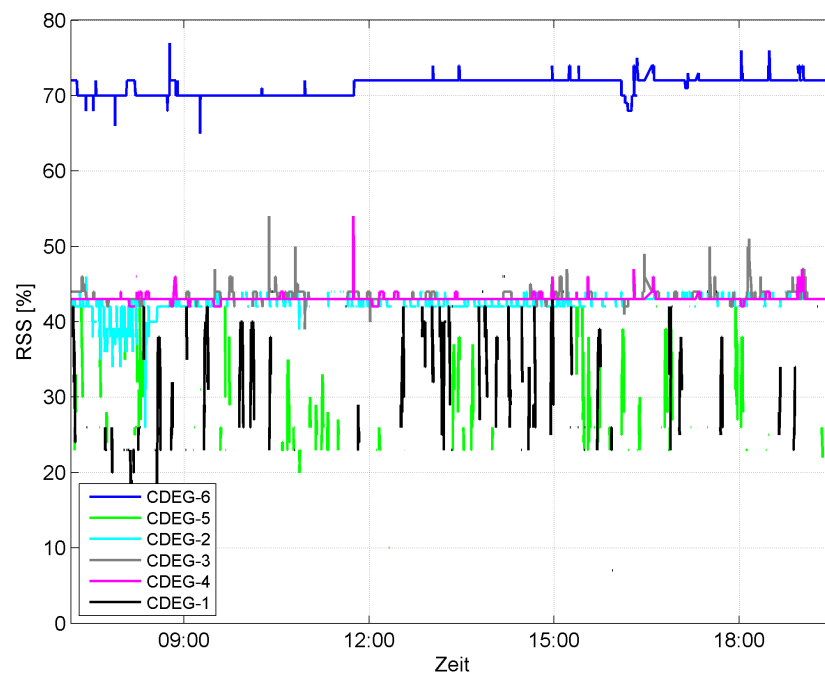


Abbildung A.2: Zeitreihe der Signalstärke über den ersten Messtag an RS2

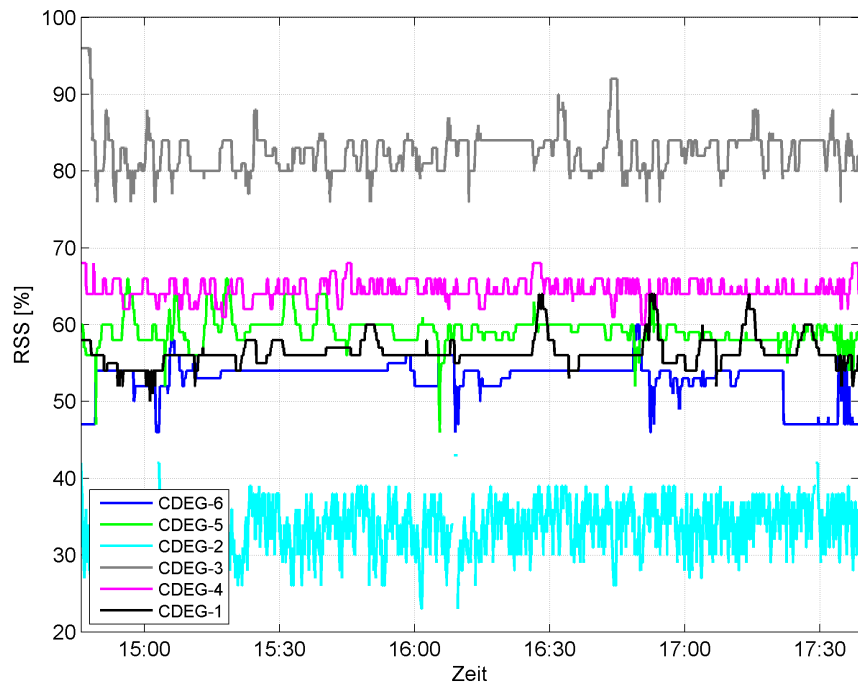


Abbildung A.3: Zeitreihe der Signalstärke über den zweiten Messtag an RS4

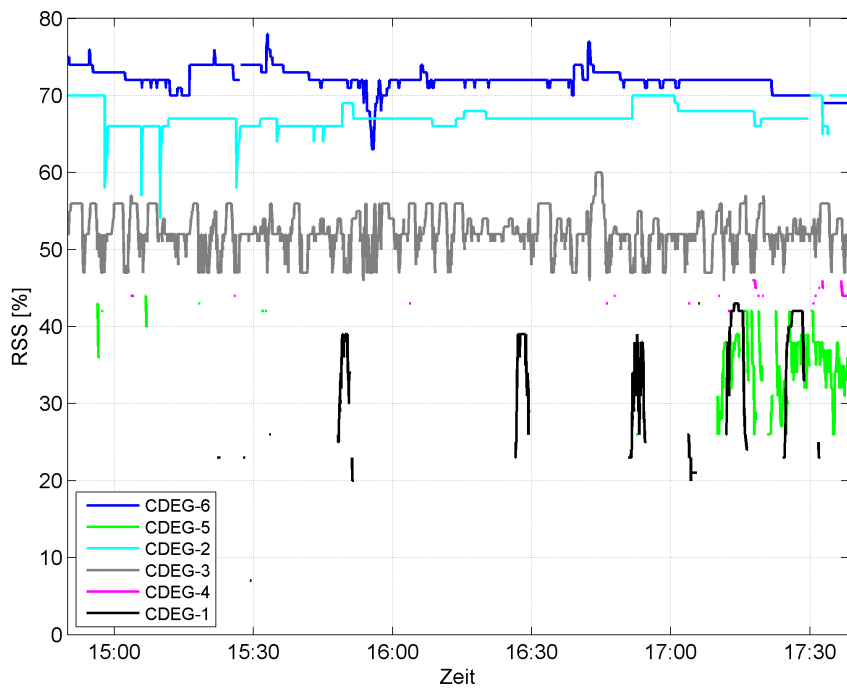


Abbildung A.4: Zeitreihe der Signalstärke über den zweiten Messtag an RS5

## A.2 Graphiken Zusammenhang Raspberry und Smartphone

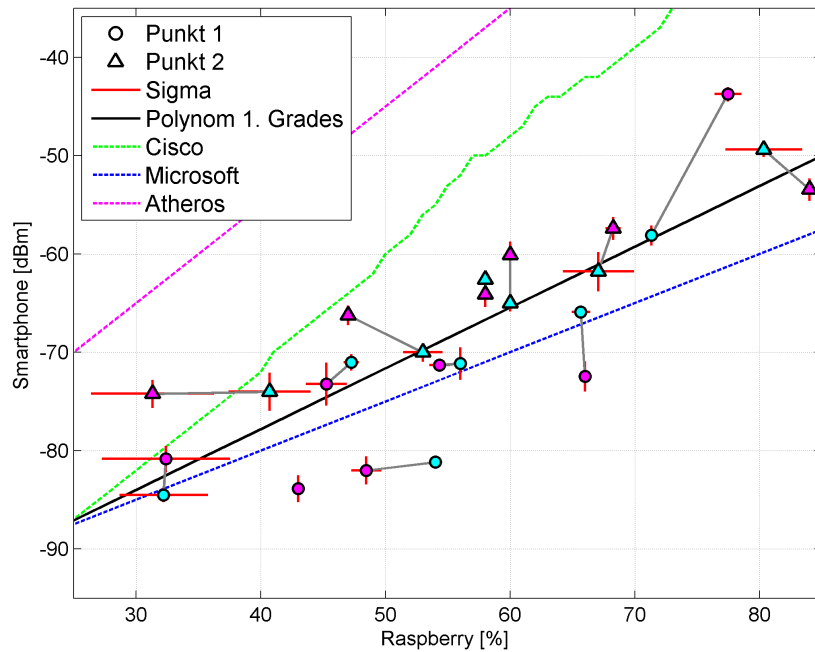


Abbildung A.5: Zusammenhang der Signalstärken zwischen Raspberry und Smartphone *Samsung Galaxy*

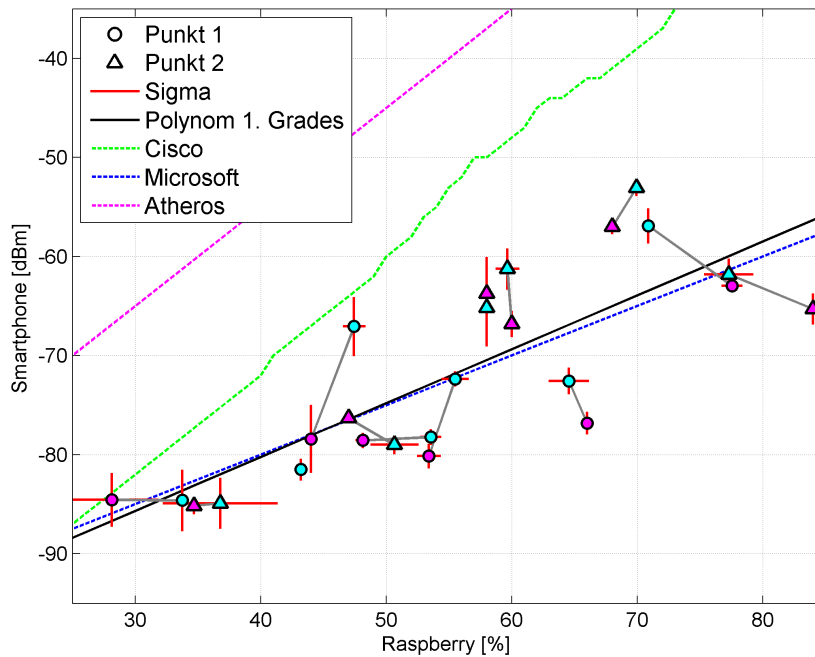


Abbildung A.6: Zusammenhang der Signalstärken zwischen Raspberry und Smartphone *HTC Desire X*

### A.3 Graphiken Längenzusammenhang

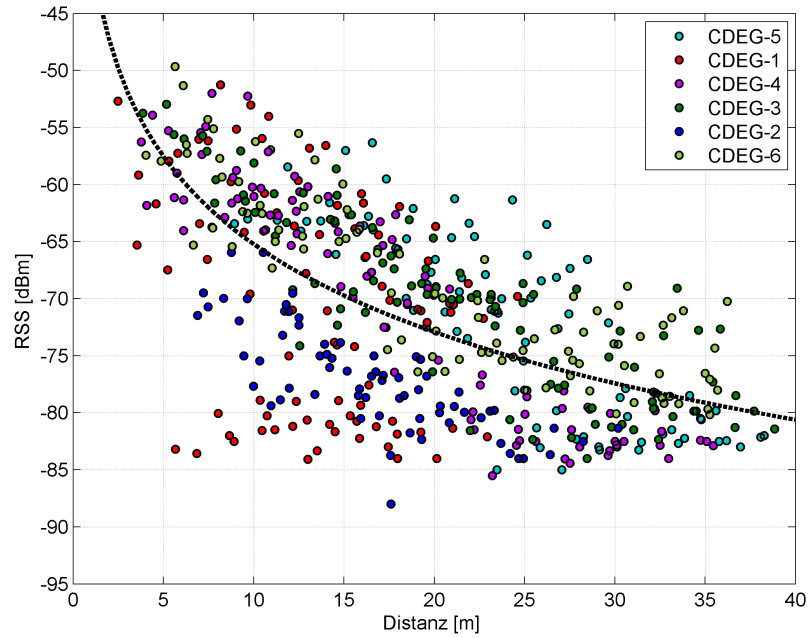


Abbildung A.7: Längendiagramm des One-Slope-Modells mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*

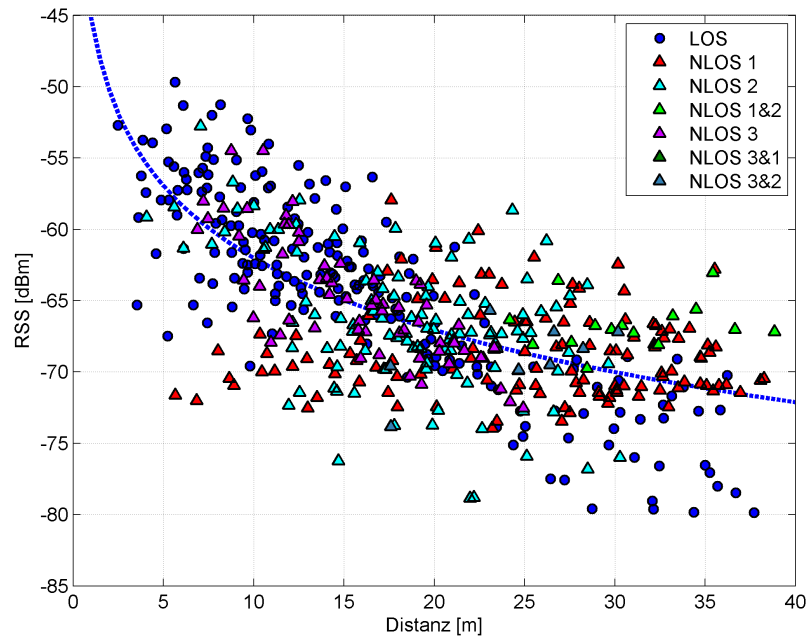


Abbildung A.8: Längendiagramm des Multi-Wall-Modells mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*

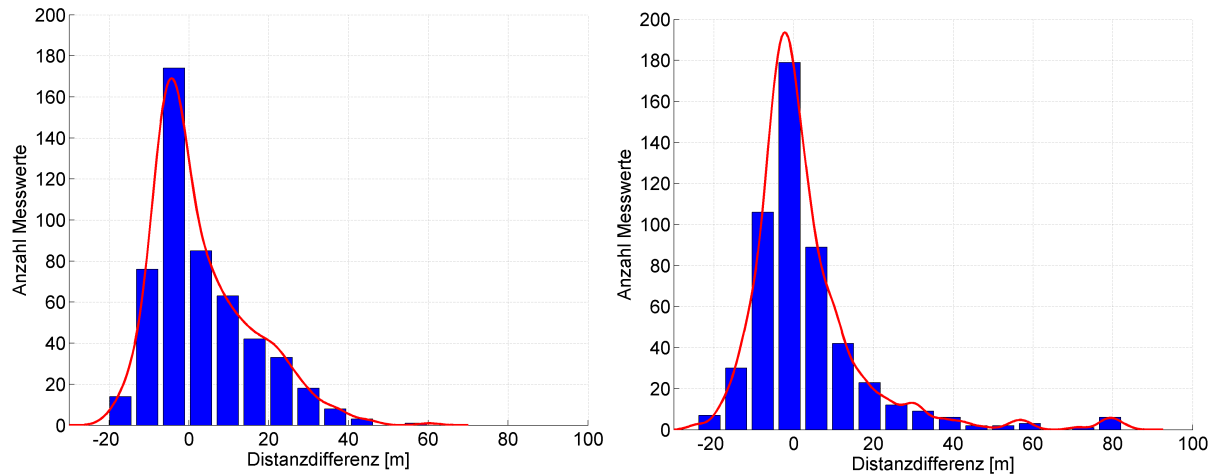


Abbildung A.9: Histogramm der Längenabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*, links: One-Slope-Modell, rechts: Multi-Wall-Modell

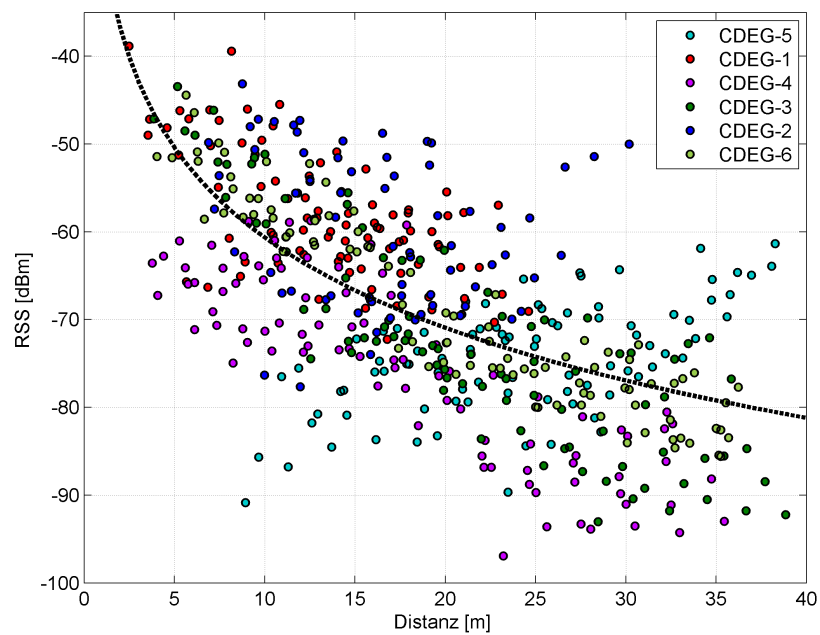


Abbildung A.10: Längendiagramm der 1. Methode des differentiellen Ansatzes mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*

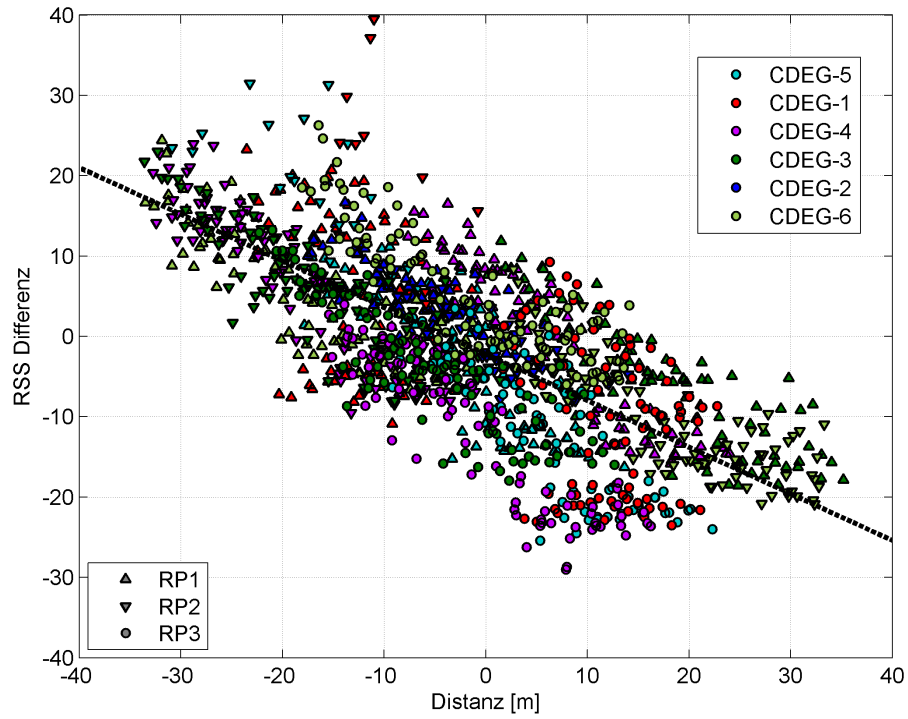


Abbildung A.11: Längendiagramm der 2. Methode des differentiellen Ansatzes mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*

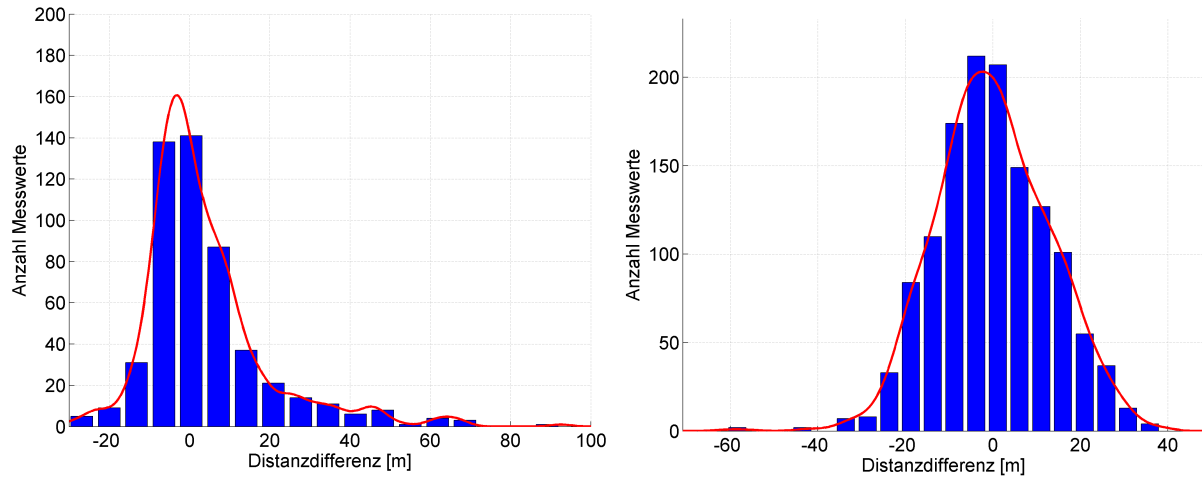


Abbildung A.12: Histogramm der Längenabweichungen mit dem Smartphone *Samsung Galaxy*, links: 1. Methode - , rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes



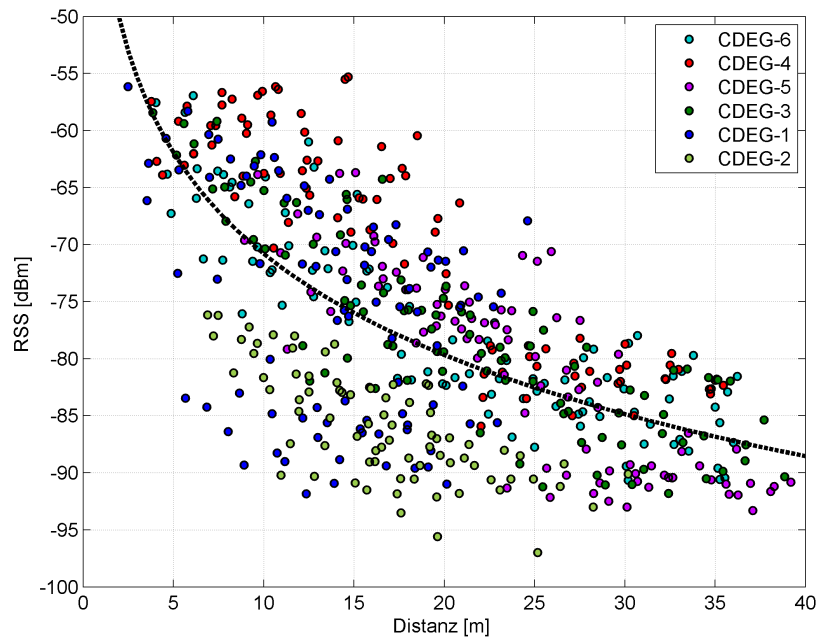


Abbildung A.13: Längendiagramm des One-Slope-Modells mit dem Smartphone *HTC Desire X*

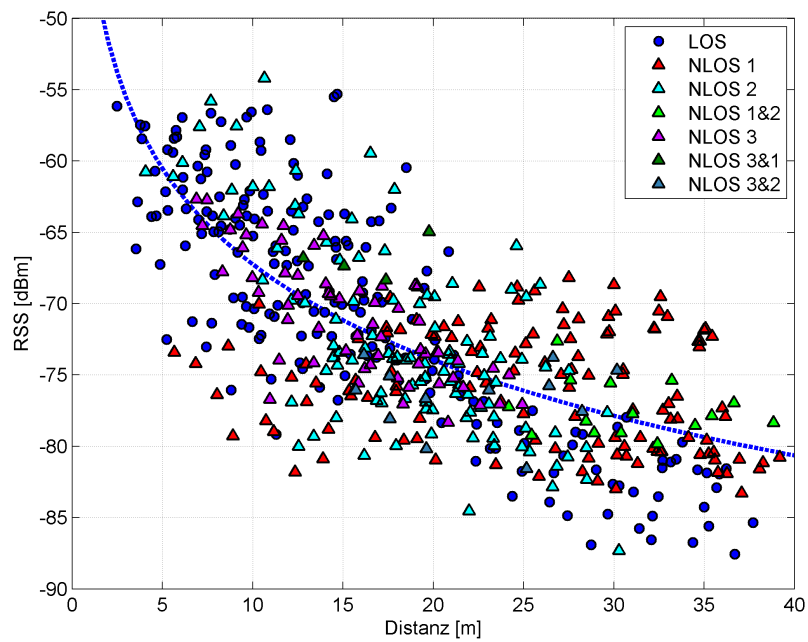


Abbildung A.14: Längendiagramm des Multi-Wall-Modells mit dem Smartphone *HTC Desire X*

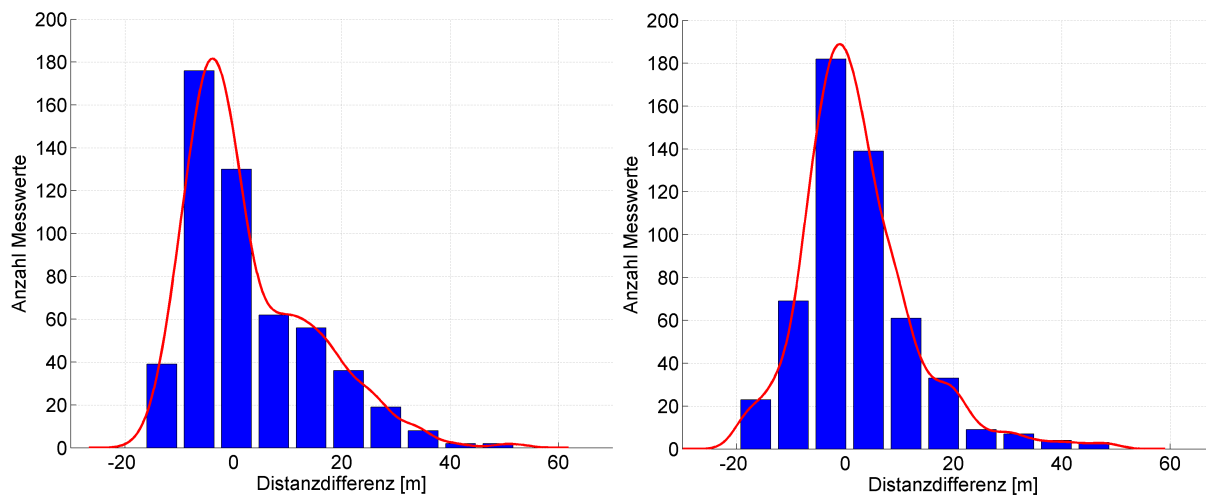


Abbildung A.15: Histogramm der Längenabweichungen mit dem Smartphone *HTC Desire X*, links: One-Slope-Modell, rechts: Multi-Wall-Modell

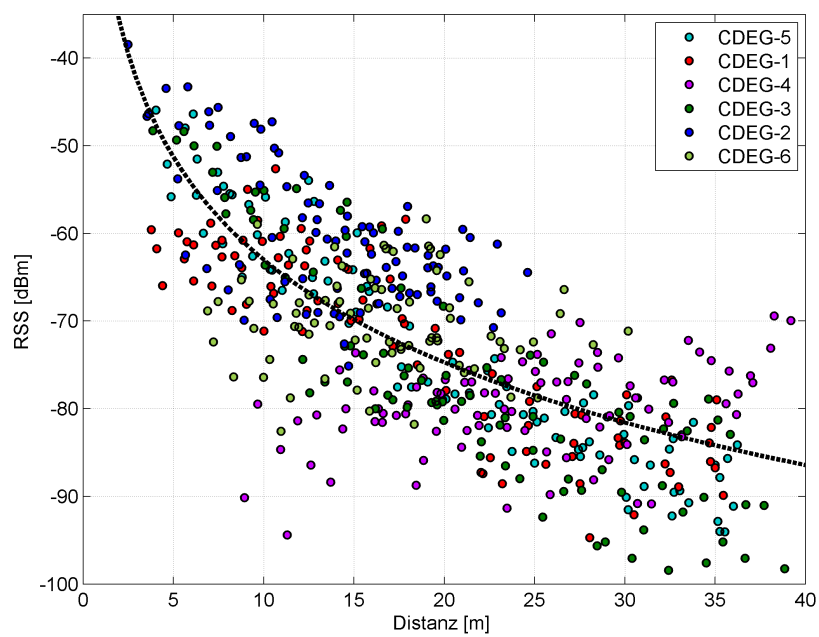


Abbildung A.16: Längendiagramm der 1. Methode des differentiellen Ansatzes mit dem Smartphone *HTC Desire X*

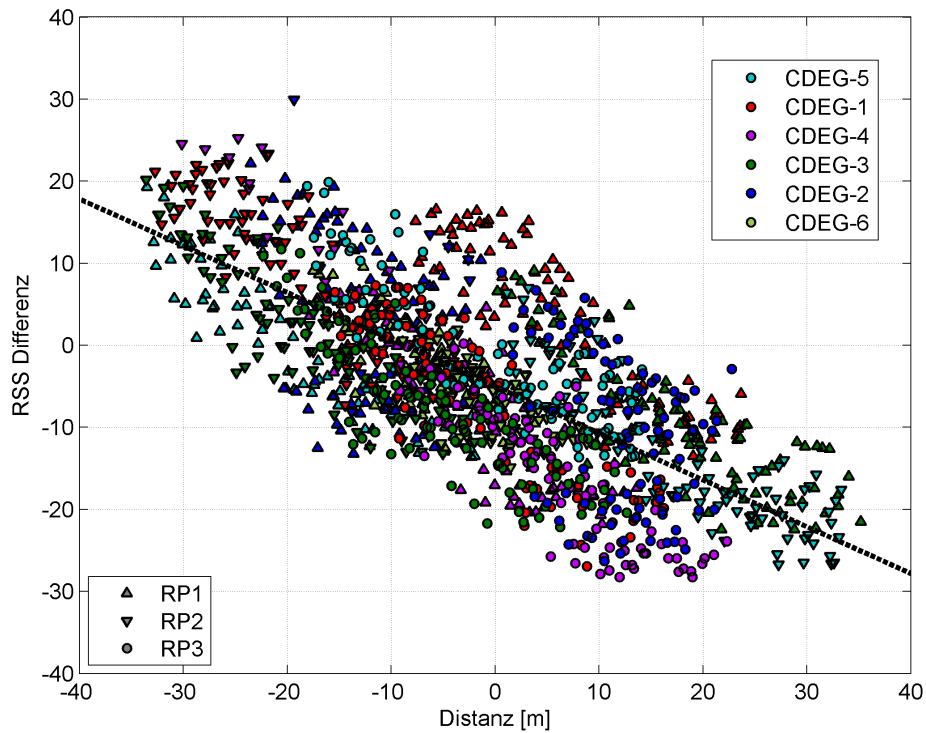


Abbildung A.17: Längendiagramm der 2. Methode des differentiellen Ansatzes mit dem Smartphone *HTC Desire X*

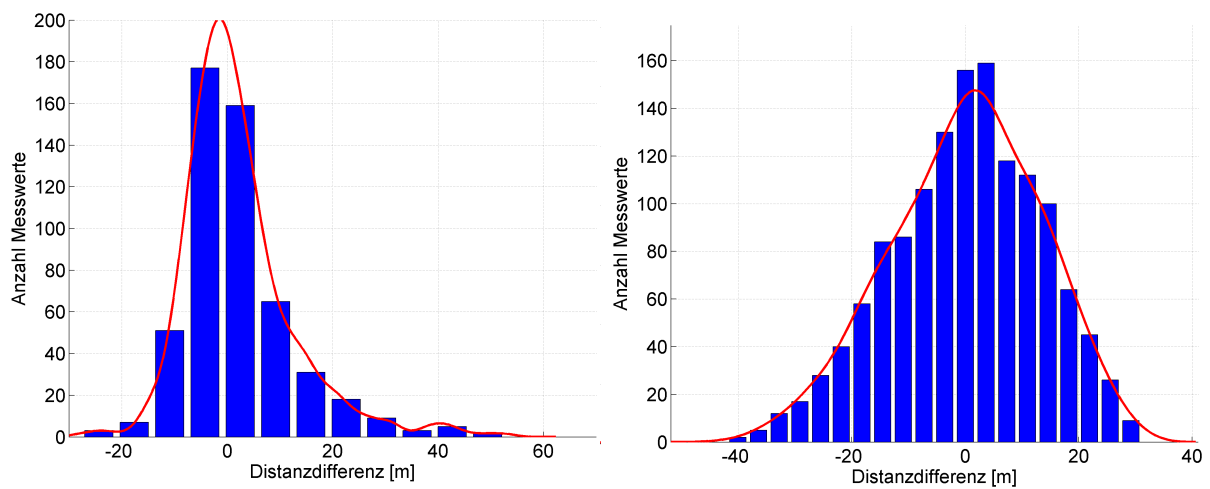


Abbildung A.18: Histogramm der Längenabweichungen mit dem Smartphone *HTC Desire X*, links: 1. Methode -, rechts: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

## A.4 Graphiken Smartphone Samsung Ace

### A.4.1 Statische Positionsbestimmung

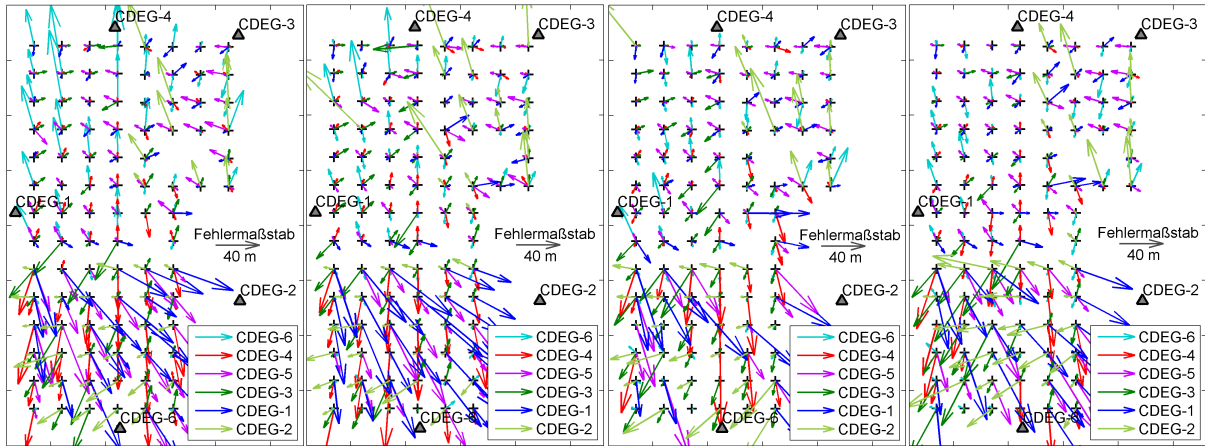


Abbildung A.19: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem One-Slope-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

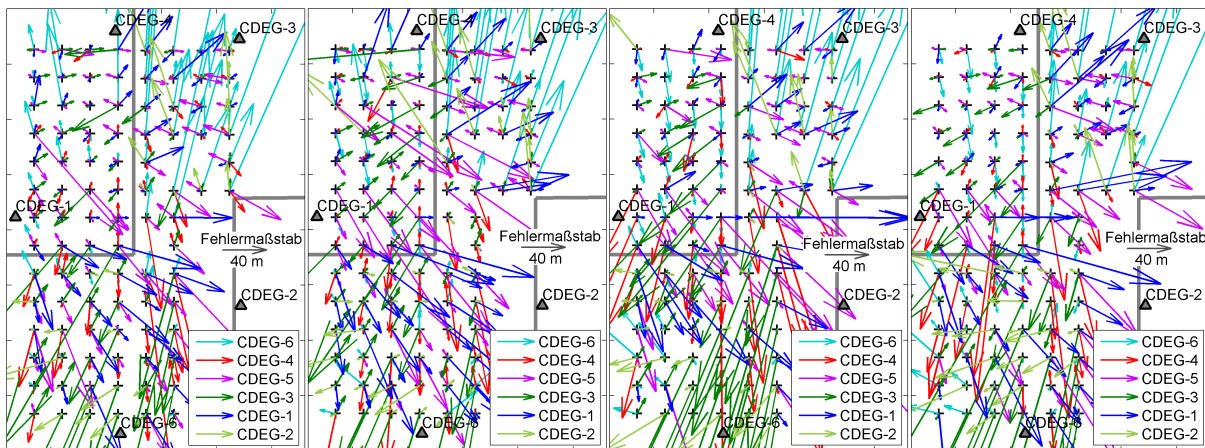


Abbildung A.20: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem Multi-Wall-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

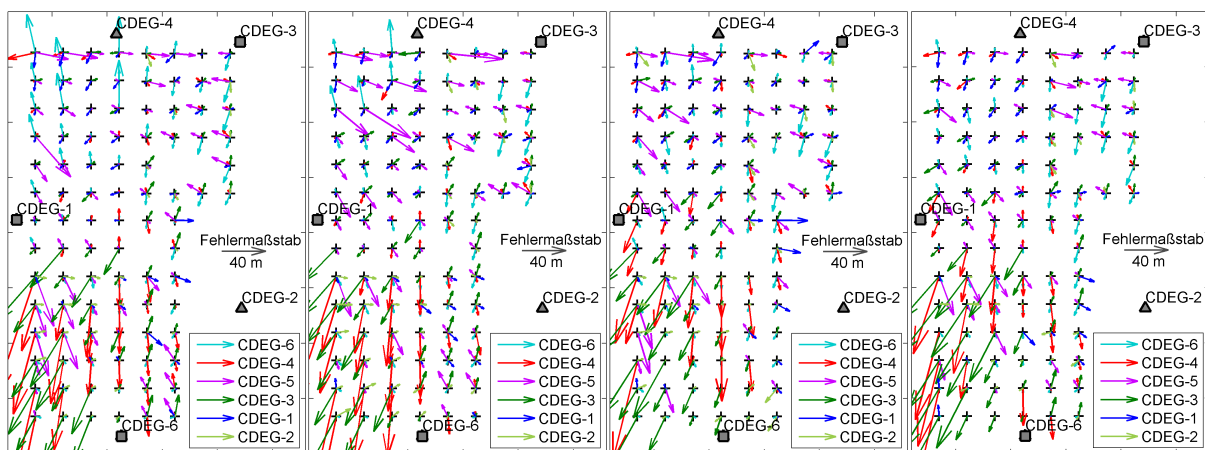


Abbildung A.21: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

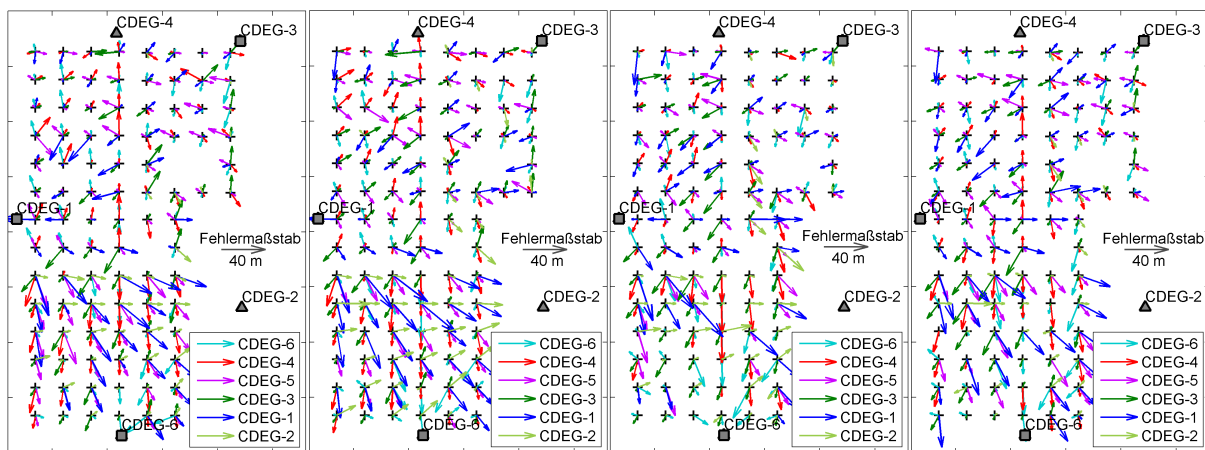


Abbildung A.22: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

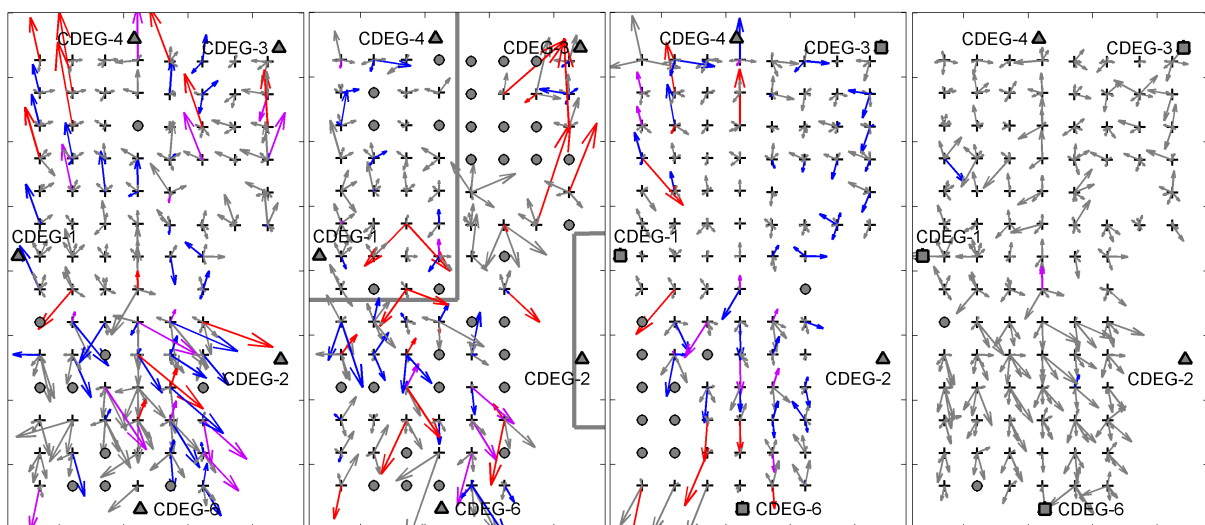


Abbildung A.23: Gewichte  $p$  der Beobachtungen jeweils in der 1. Userorientierung, links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode -, 2. Methode des differentiellen Ansatzes

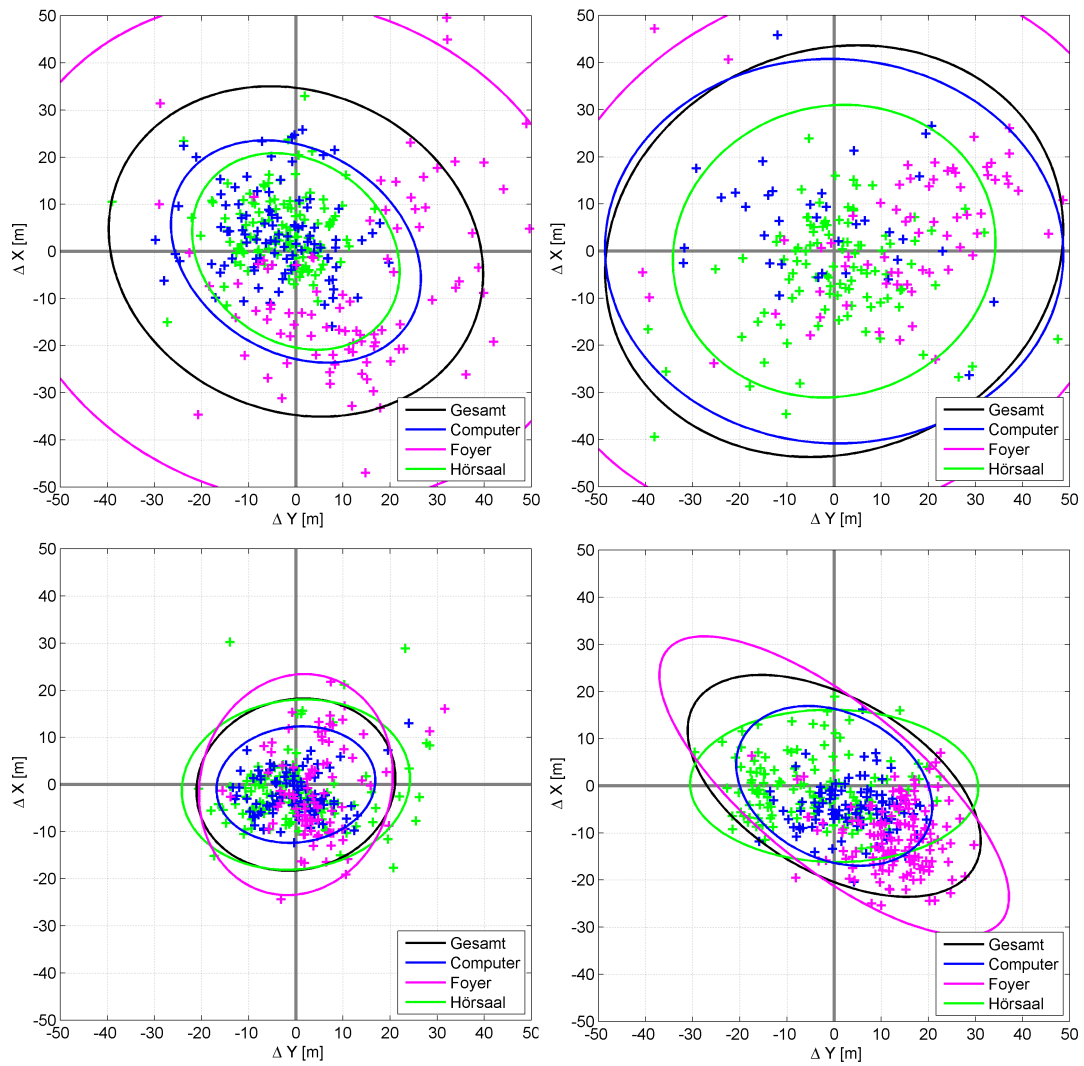


Abbildung A.24: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode -, rechts unten: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

## A.4.2 Kinematische Positionsbestimmung

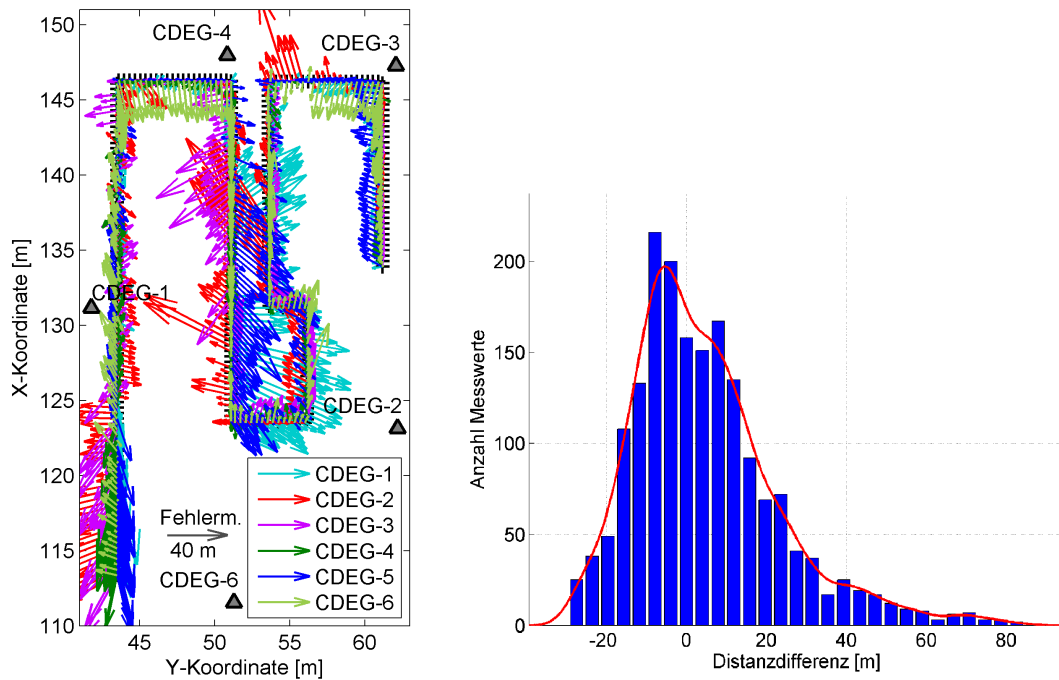


Abbildung A.25: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem One-Slope-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

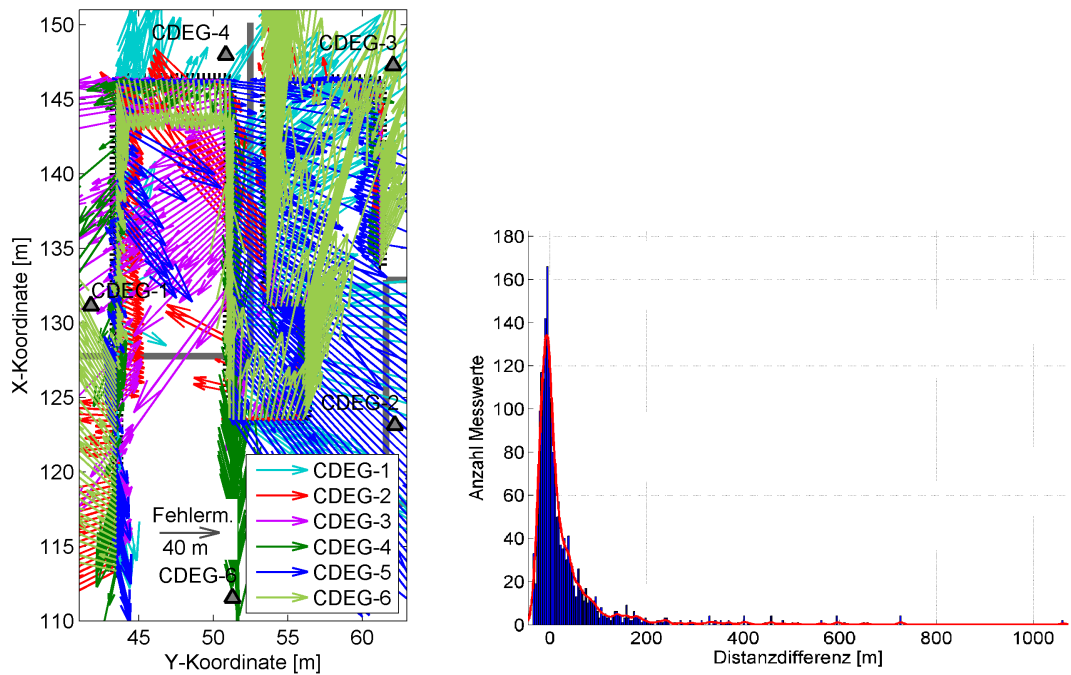


Abbildung A.26: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem Multi-Wall-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4



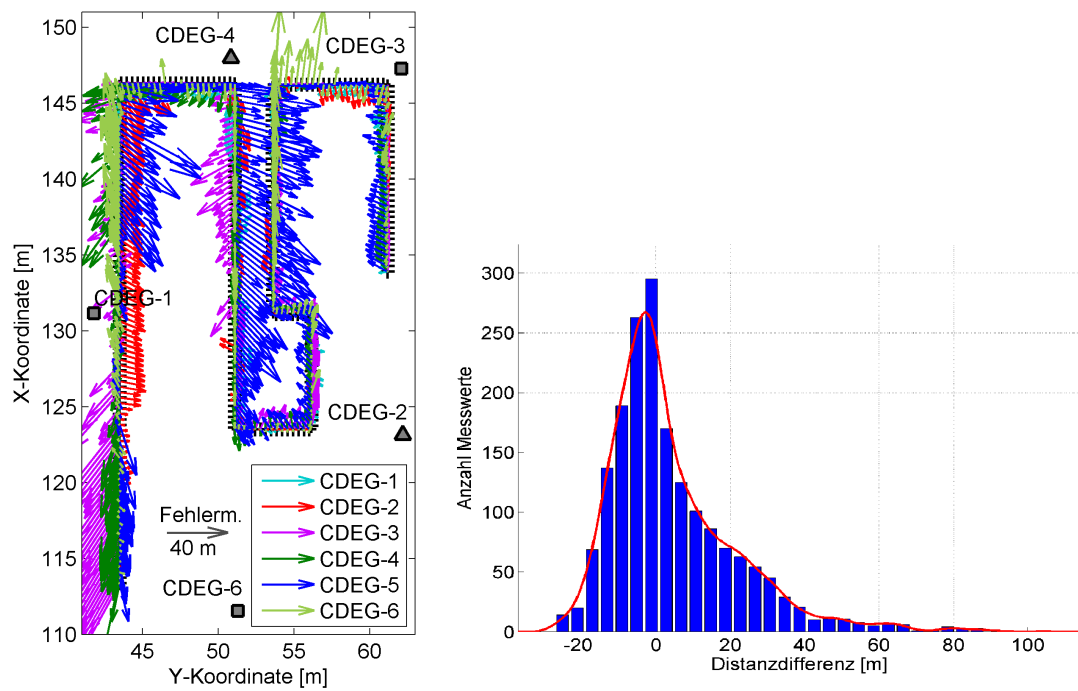


Abbildung A.27: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

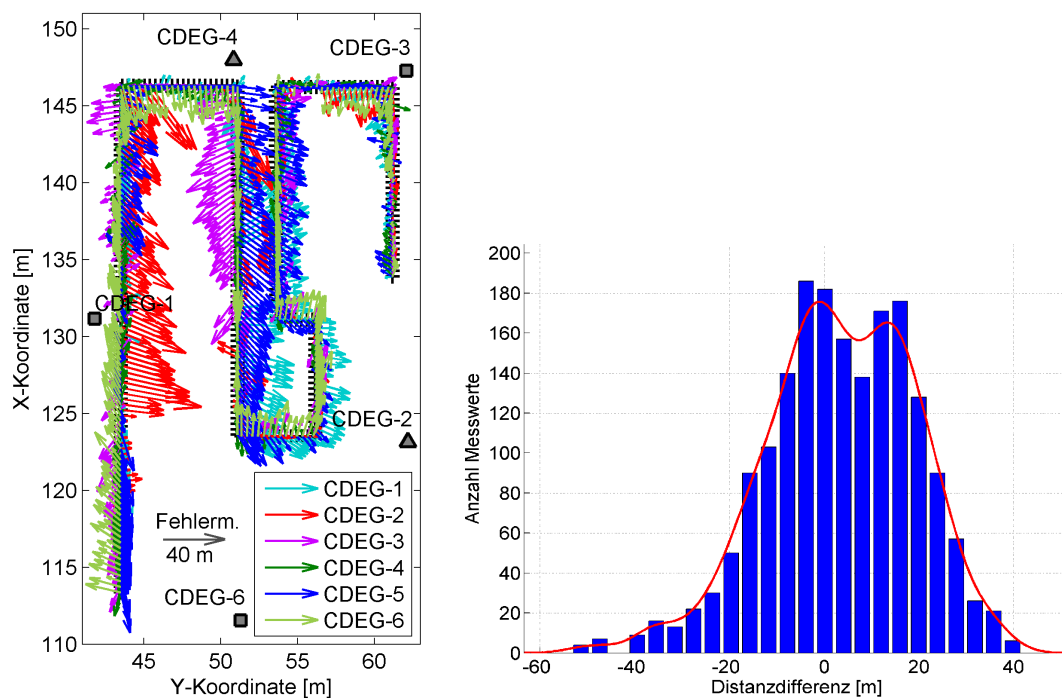


Abbildung A.28: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4



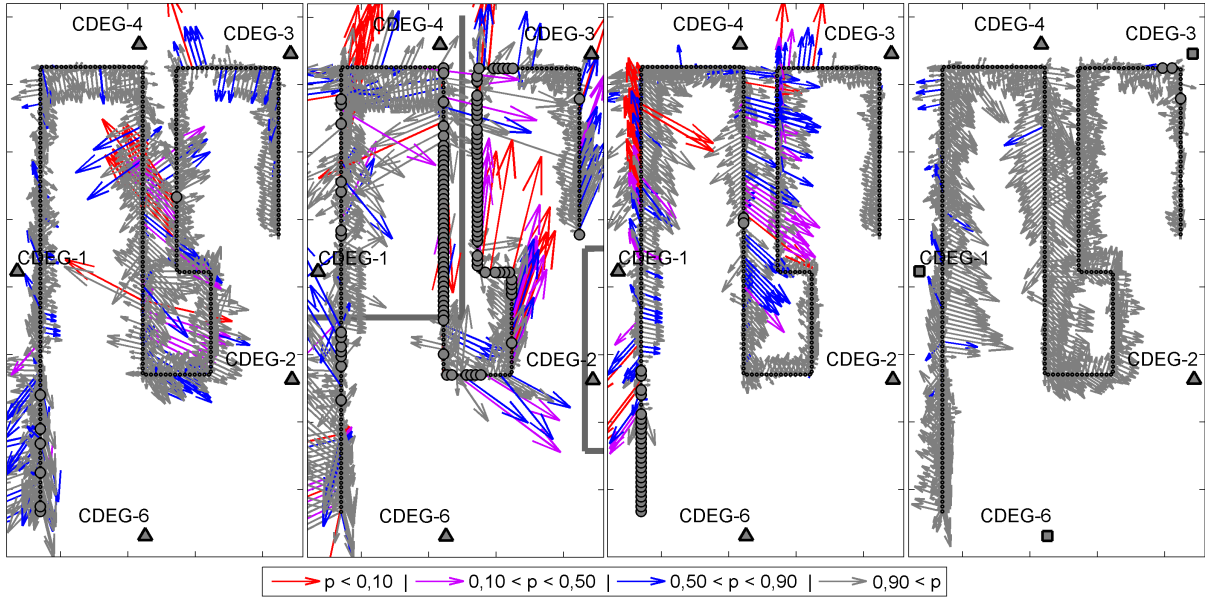


Abbildung A.29: Gewichte  $p$  der Beobachtungen, von links nach rechts: One-Slope-Modell, Multi-Wall-Modell, 1. Methode - , 2. Methode des differentiellen Ansatzes

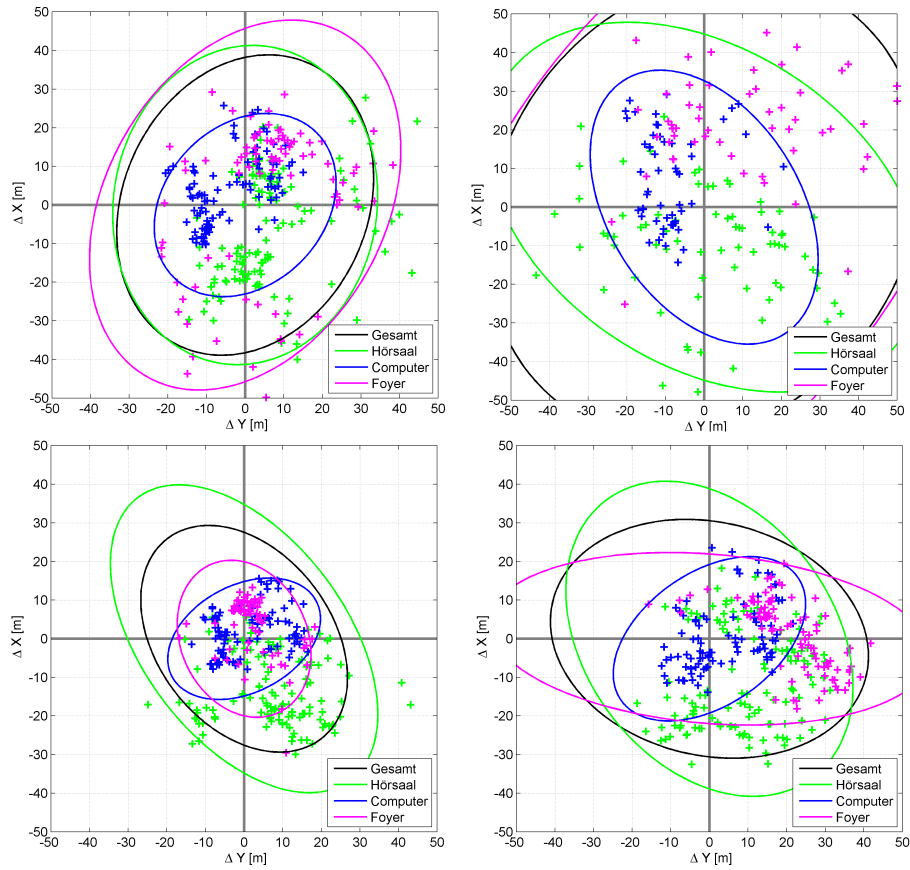


Abbildung A.30: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode - , rechts unten: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

## A.5 Graphiken Smartphone Samsung Galaxy

### A.5.1 Statische Positionsbestimmung

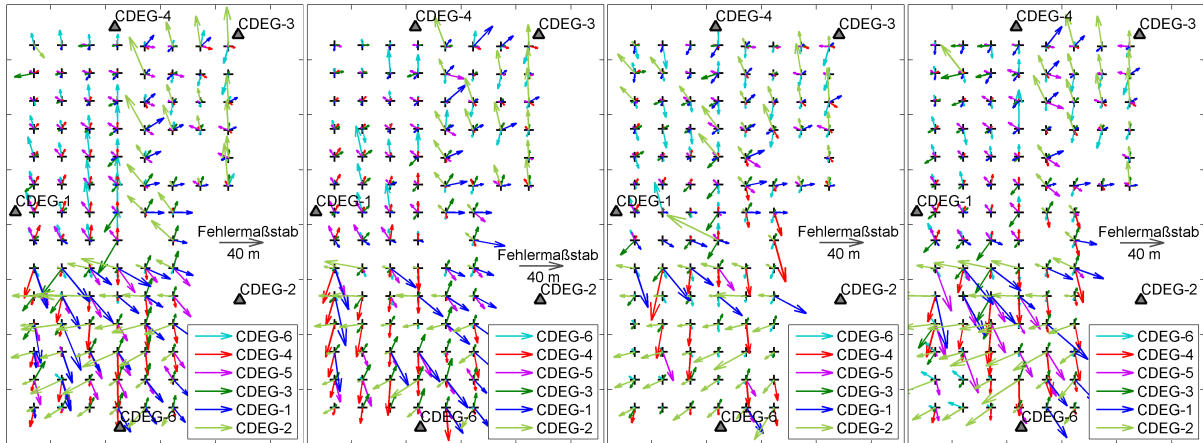


Abbildung A.31: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem One-Slope-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

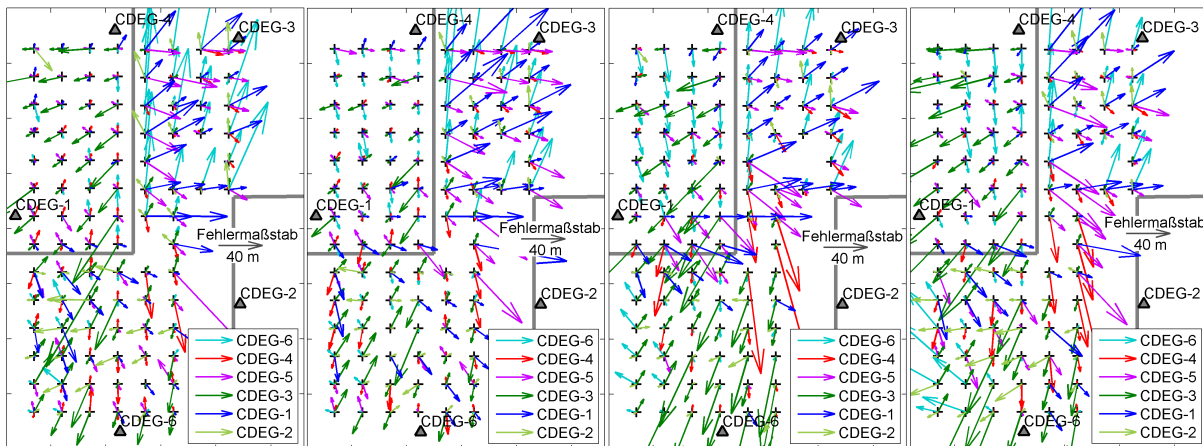


Abbildung A.32: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem Multi-Wall-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

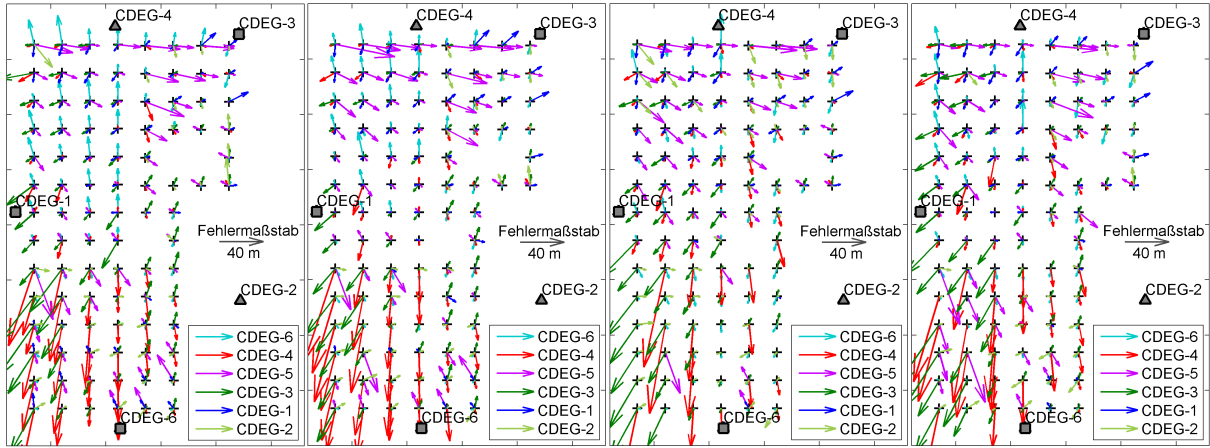


Abbildung A.33: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

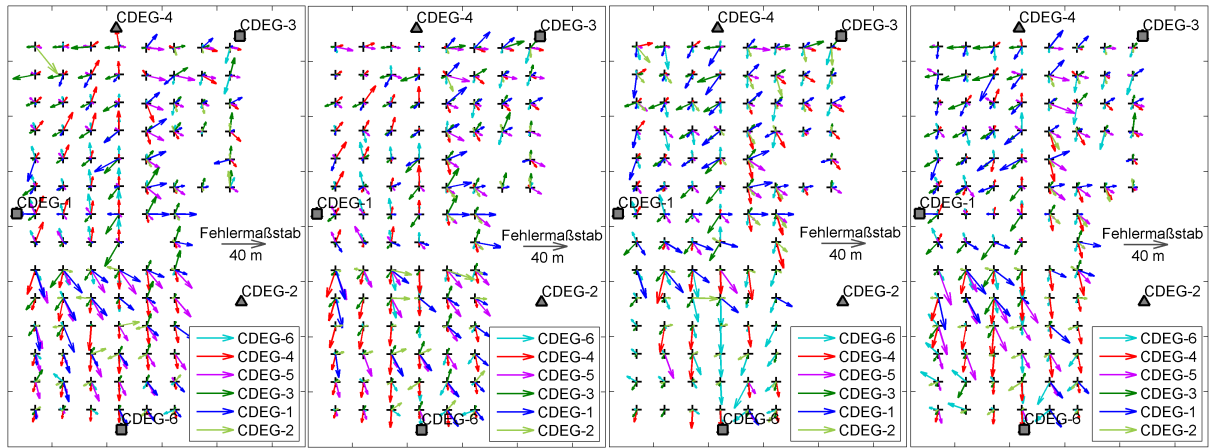


Abbildung A.34: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

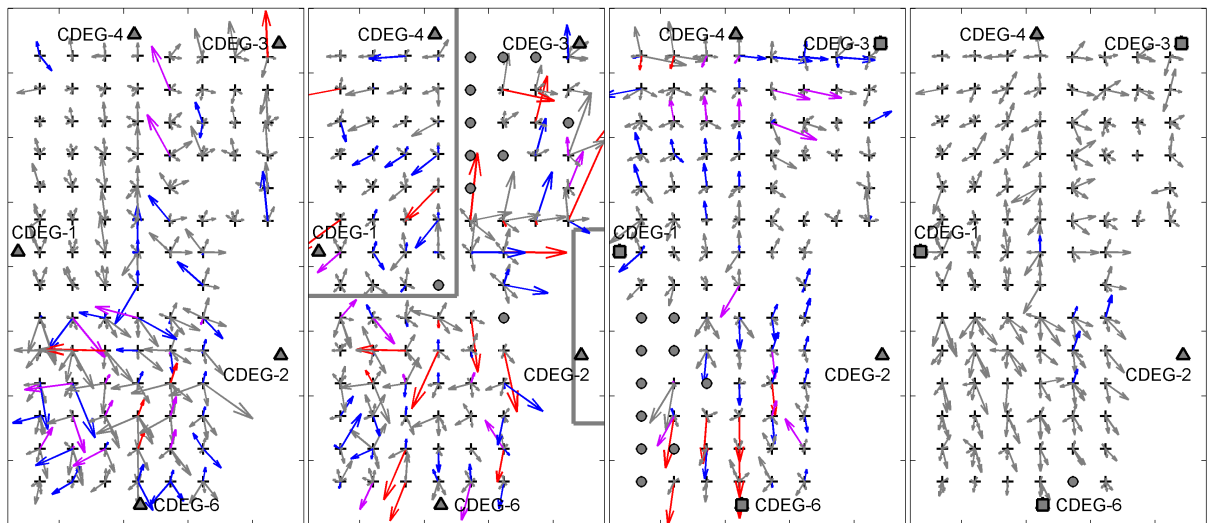


Abbildung A.35: Gewichte  $p$  der Beobachtungen jeweils in der 1. Userorientierung, links nach rechts: One-Slope-, Multi-Wall-Modell, 1. Methode -, 2. Methode des differentiellen Ansatzes

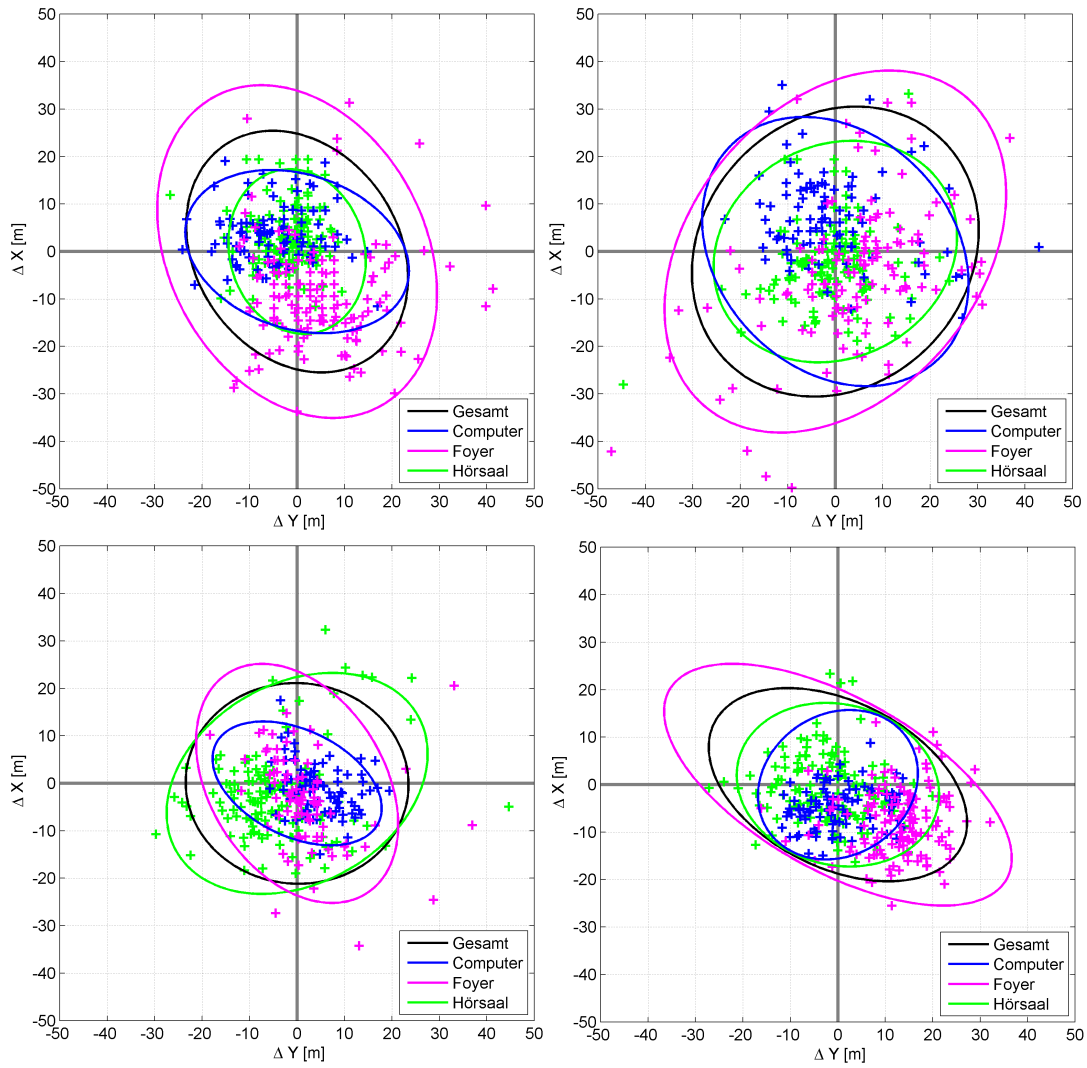


Abbildung A.36: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode -, rechts unten: 2. Methode des differentiellen Ansatzes

## A.5.2 Kinematische Positionsbestimmung

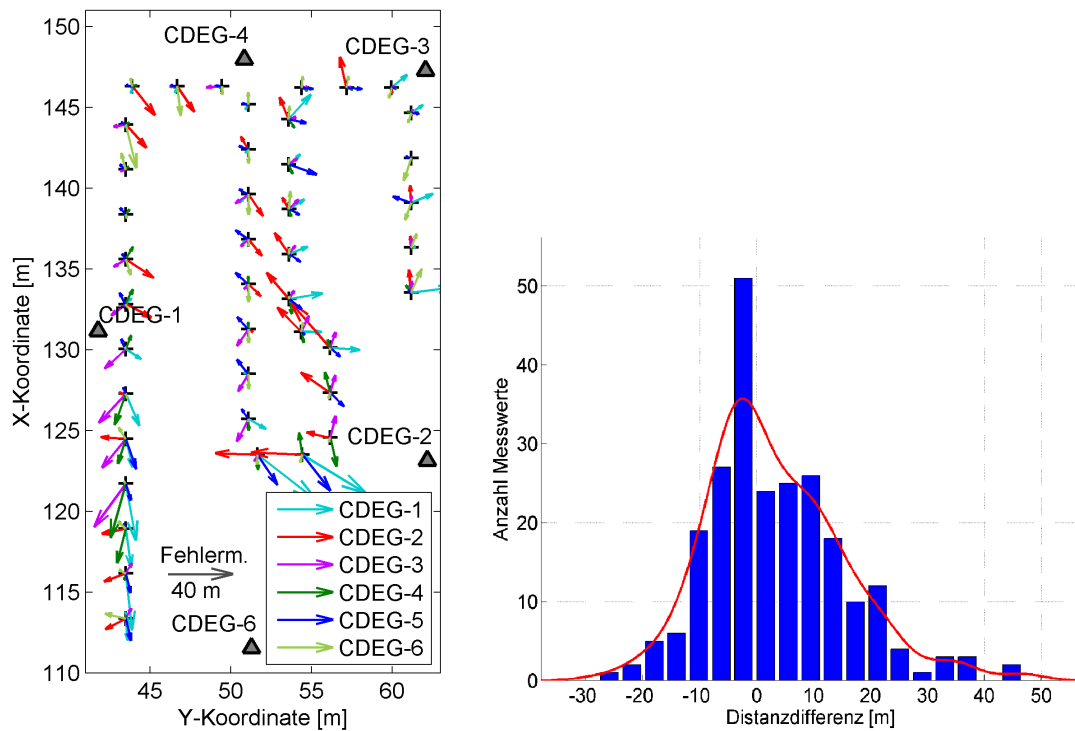


Abbildung A.37: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem One-Slope-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

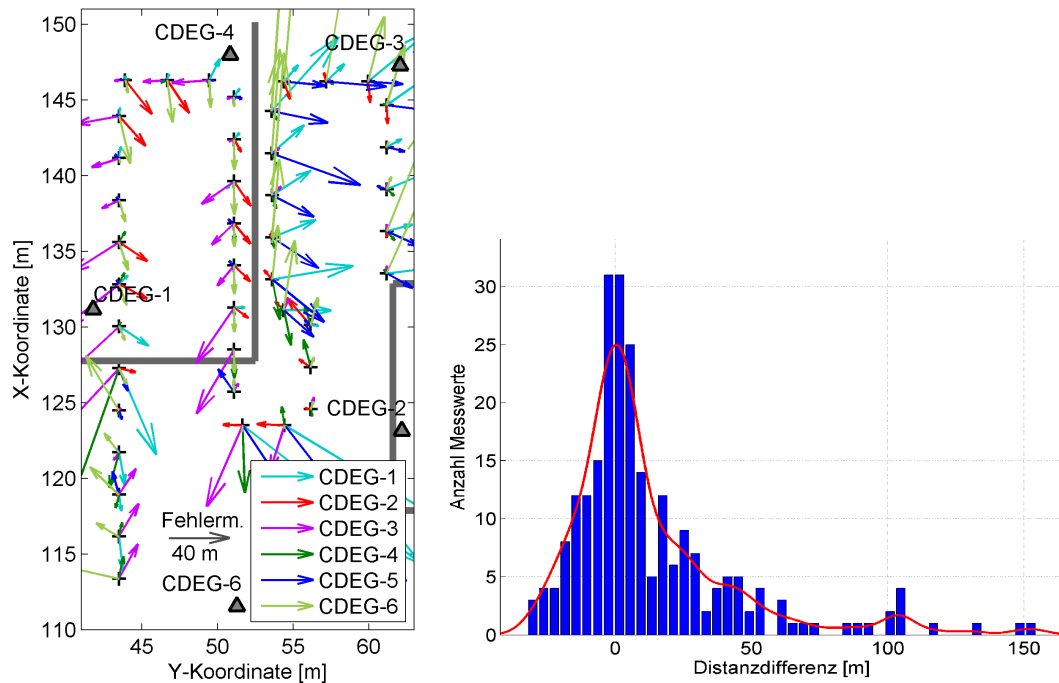


Abbildung A.38: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit dem Multi-Wall-Modell, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

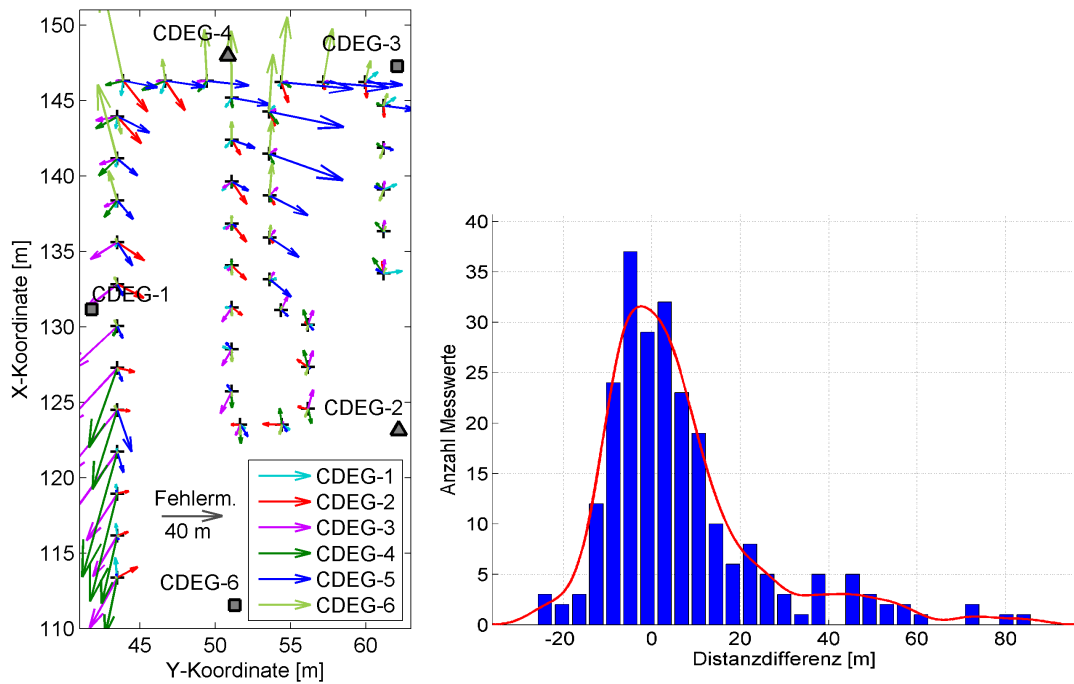


Abbildung A.39: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 1. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

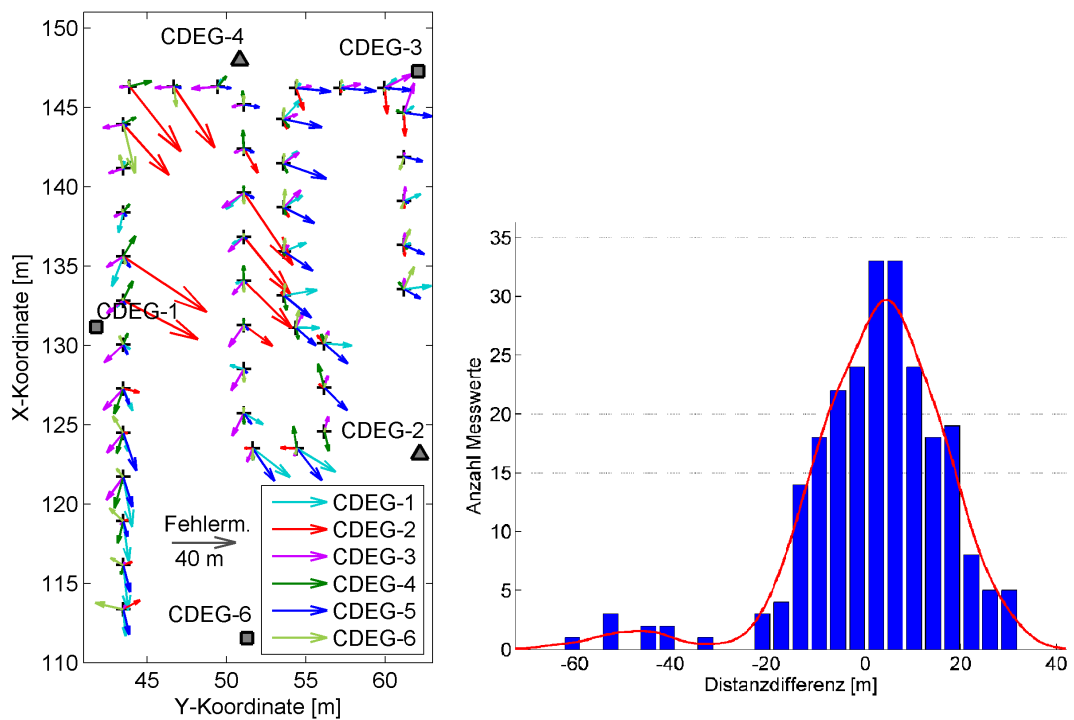


Abbildung A.40: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen mit der 2. Methode des differentiellen Ansatzes, von links nach rechts: Userorientierung 1-4

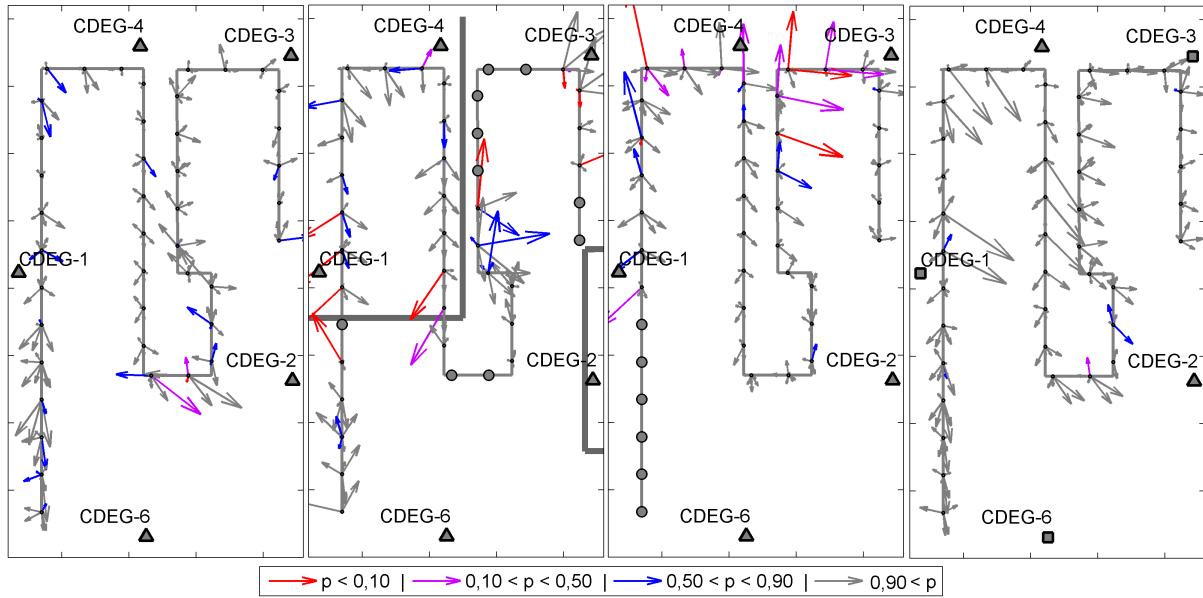


Abbildung A.41: Gewichte  $p$  der Beobachtungen, von links nach rechts: One-Slope-Modell, Multi-Wall-Modell, 1. Methode -, 2. Methode des differentiellen Ansatzes

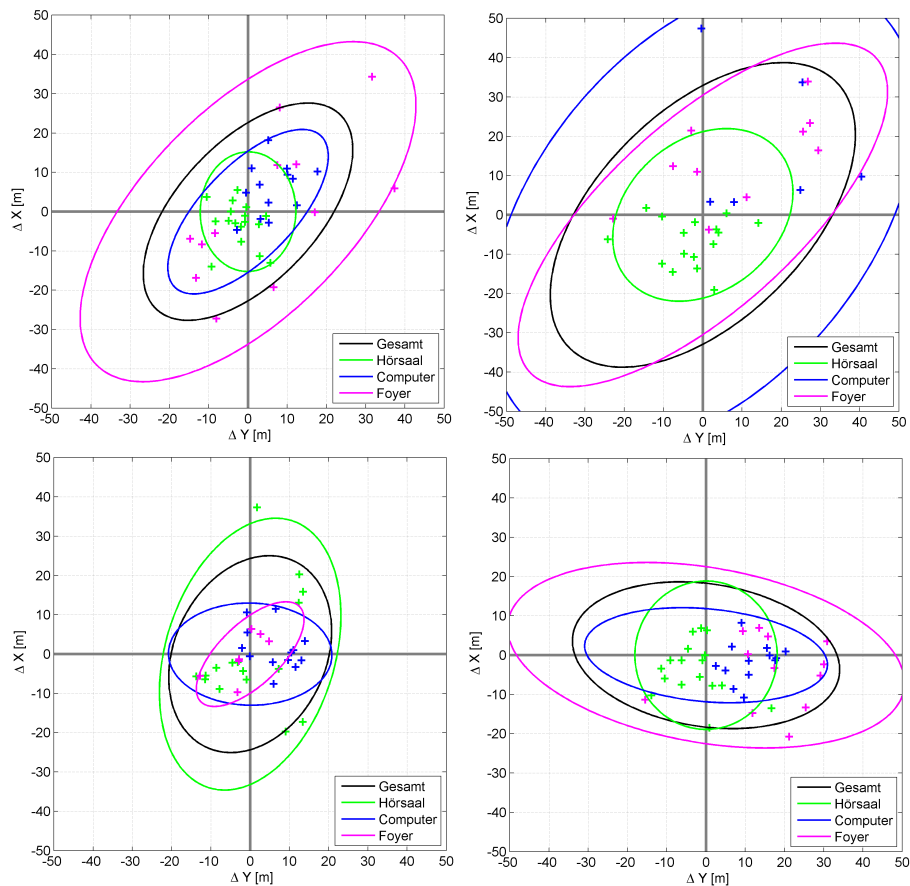


Abbildung A.42: Positionsabweichungen mit 95% Konfidenzellipsen, links oben: One-Slope-Modell, rechts oben: Multi-Wall-Modell, links unten: 1. Methode -, rechts unten: 2. Methode des differentiellen Ansatzes