

Positionierung in Gebäuden mit differenziellem WLAN

Günther Retscher und Thomas Tatschl

Zusammenfassung

Die Positionsbestimmung von Smartphones in Gebäuden mit Hilfe von WLAN hat sehr an Bedeutung gewonnen. Im Rahmen dieser Studie wird die Position eines mobilen Nutzers 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. Im Multi-Wall-Modell werden zusätzlich Dämpfungseffekte der Wände berücksichtigt. In zwei neuen differenziellen Methoden wird durch die Verwendung von Referenzstationen versucht, die zeitliche Variation und diverse Ausbreitungseffekte der WLAN-Signale zu minimieren. In der ersten Methode werden ähnlich dem DGPS-Verfahren Korrekturen von den Referenzstationsdaten abgeleitet und am Nutzer angebracht. Im Gegensatz dazu wird in der zweiten Methode basierend auf dem VLBI-Prinzip eine Differenzenbildung der empfangenen Signalstärken durchgeführt und in Distanzdifferenzen umgewandelt. In den praktischen Anwendungen wurden mit drei unterschiedlichen Smartphones statische Messungen in einem Bürogebäude ausgeführt. Bei guten räumlichen Bedingungen konnte eine Reduktion der mittleren Positionsabweichung auf rund 5 m erzielt werden.

Summary

Position determination of smartphones in buildings is of growing interest. Within the scope of this study the position of a mobile user is determined on the basis of (tri)lateration. Four methods for the conversion of the received signal strength of the WLAN signals into ranges are introduced. In the first method, the so-called one-slope model, this conversion is performed using a logarithmic function. In the multi-wall model damping effects of the walls are considered, in addition. In two novel differential approaches temporal variations and various propagation effects are minimized by using reference stations. The first differential approach is based on DGPS where corrections from the reference stations are derived and applied by the user. In contrast to the first method, a differentiation of the received signal strengths based on the VLBI principle is performed in the second differential approach. In practical use cases conducted in an office building with three different smartphones, static positioning yielded to position errors of about 5 m in average under good spatial conditions.

Schlüsselwörter: Indoor-Positionierung, WLAN, Trilateration, Modellierung der Signalausbreitung, Differenzielle Methoden, DGPS-Prinzip, VLBI-Prinzip

1 Einleitung und Motivation

Der momentane Ort eines Smartphone-Nutzers ist für zahlreiche Anwendungen essenziell. In der Indoor-Positionierung ist sehr viel Forschungspotenzial vorhanden, da GNSS eine unzureichende Verfügbarkeit bieten. Im Rahmen dieser Studie wird unter Verwendung von Wireless Local Area Network (WLAN) die Position eines mobilen Nutzers auf Basis der Trilateration bestimmt. Der große Vorteil gegenüber anderen Technologien (RFID, Bluetooth, UWB, etc.) ist, dass in vielen öffentlichen Gebäuden, in denen die Positionierung von großem Interesse ist, die benötigte WLAN-Infrastruktur bereits vorhanden ist. Bei der Trilateration mit WLAN werden Distanzen aus empfangenen Signalstärken (engl. Received Signal Strength Indicator RSSI) abgeleitet. Im Gegensatz zum üblichen Fingerprinting ist bei der Trilateration keine lange Trainingsphase, bei der eine Datenbank mit RSSI-Werten aufgebaut werden muss, nötig. Eine bedeutende Herausforderung ist die Modellierung der Effekte von Absorption, Reflexion und Streuung der WLAN-Signale. Der erste Autor dieses Beitrags hatte die Idee, ein differenzielles Verfahren basierend auf differenziellem GPS (DGPS) zu entwickeln. Die zeitliche Variation des RSSI soll durch den permanenten Scan von Referenzstationen berücksichtigt werden. Dadurch können Variationen der Signalstärke und Ausbreitungsfehler mit Hilfe der Referenzstationsdaten in den Längenzusammenhang mit einbezogen werden. Bei den ersten Untersuchungen hat man gesehen, dass auch die Entwicklung einer weiteren, zweiten Variante basierend auf der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) sinnvoll ist. Beide Methoden werden in diesem Beitrag vorgestellt und anhand von umfangreichen Testmessungen in einem Bürogebäude evaluiert.

2 Indoor-Positionierungsverfahren

Abhängig von den Methoden der Bestimmung, nämlich der Art der Messung von Signalen, der Netzarchitektur oder der Netzausdehnung, lassen sich die Positionierungsverfahren, die auch für den Indoor-Bereich genutzt werden können, unterteilen. Grundsätzlich kann zwischen absoluter Positionierung und relativer Positionierung unterschieden werden. Bei der relativen Positionierung kann die aktuelle Position mit Inertialsensoren, wie z. B. einem Beschleunigungssensor und Gyroskop, wie sie in modernen Smartphones und Tablets vorhanden sind, über Koppelnavigation (Dead Reckoning) bestimmt werden. In diesem Beitrag werden ausschließlich absolute Positionierungsverfahren betrachtet. Folgende Methoden kön-

nen generell eingesetzt werden (siehe z.B. Mautz 2012, Liu et al. 2007, Retscher 2016, Stojanović und Stojanović 2014):

- Zellbasierte Verfahren (Cell of Origin CoO),
- Trilateration mit Distanzen abgeleitet über Laufzeitmessung (Time of Arrival ToA) bzw. RSSI-Messung,
- Hyperbolische Trilateration über Laufzeitdifferenzmessung (Time Difference of Arrival TDoA),
- Winkelmessung durch Messung des Einfallswinkels (Angle of Arrival AoA),
- Szenenanalyse mit gemessenen Signalstärken und digitalen Bildern sowie
- Location Fingerprinting.

Ziel der Trilateration ist es, die Position des Smartphone-Nutzers mittels Distanzen zu bekannten Punkten zu bestimmen. Diese Entfernungen werden über ToA-Messungen oder aus gemessenen Signalstärken RSSI bestimmt. Im zweiten Fall muss zuvor mit einem Zusammenhang zu den empfangenen RSSI-Werten die Distanz abgeleitet werden. Zur eindeutigen mathematischen Lösung dieser Schnittaufgabe sind im zweidimensionalen Fall drei und im 3D-Fall vier Beobachtungen erforderlich. Die Lage (3D-Koordinate) der einzelnen Sender (Access Points APs im Falle von WLAN) ist zuvor in einem definierten Koordinatensystem zu bestimmen (Retscher 2016, Shchekotov 2008, Yang und Chen 2009). Im Grunde genommen genügt es, im Indoor-Bereich eine zweidimensionale Positionsbestimmung durchzuführen, da die Höhe des Nutzers zumeist eine untergeordnete Rolle spielt, da nur jenes Stockwerk des Gebäudes von Bedeutung ist, in welchem sich der Nutzer gerade befindet. Die Stockwerksbestimmung kann durch eine kausale Abfrage geklärt werden, bspw. in welchem Stockwerk sich die meisten empfangenen APs des aktuellen Scans befinden. Natürlich kann diese Stockwerksbestimmung des Smartphone-Nutzers auch Probleme bereiten, wenn sich in einem Stockwerk wenige oder gar keine AP befinden oder sich der Nutzer gerade im Stiegenhaus oder im Lift befindet. Dieses Problem kann auch durch barometrische Höhenbestimmung mit dem Drucksensor, wie er bereits in vielen modernen Smartphones zu finden ist, gelöst werden (Retscher 2007).

Bei der Szenenanalyse wird die Position anhand von Umgebungsdaten ermittelt. Für die Aufnahme der Umgebung können mehrere unterschiedliche Sensoren herangezogen werden. Man unterscheidet zwischen statischer und differenzieller Szenenanalyse. Bei der statischen Methode werden die erlangten Informationen mit einer Datenbank, in der Referenzpunkte und deren Umgebungsdaten gespeichert sind, abgeglichen und daraus auf die Position geschlossen. Bei der differenziellen Methode werden nicht nur die aktuellen Messdaten, sondern ebenfalls die vorherigen verwendet. Durch den Vergleich der aufgenommenen Daten kann das System auch auf die Bewegung schließen. Messgrößen sind entweder Signalstärkenmessung (Fingerprinting, Signalstärkenmodellierung) oder digitale Bilder. Im zweiten Fall können unter

Verwendung von speziellen Messkameras mittels photogrammetrischer Auswerteverfahren räumliche Informationen gewonnen und anschließend für eine Positionierung weiter prozessiert werden.

Im Fingerprinting wird der Effekt der Dämpfung und Reflexion ausgenutzt, um die Position zu bestimmen (Mok und Retscher 2007). Dazu wird die empfangene Signalstärke mit einem Referenzdatensatz in einer Datenbank verglichen. Diese Datenbank wird in der sogenannten Trainingsphase (offline-Phase) erstellt. Hierbei werden an bekannten ausgewählten Positionen die RSSI aller APs gesammelt. Die eigentliche Positionierung des Nutzers geschieht in der online-Phase, wo der wahrscheinlichste Datensatz in der Datenbank den Nutzerstandort widerspiegelt (siehe z.B. Honkavirta 2008, Kjærgaard 2007). Die Genauigkeit dieser Positionierungsmethode ist im Wesentlichen von der Rasterweite der Referenzdaten abhängig und liegt bei vernünftig gewählten Referenzpunkten bei wenigen Metern. 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 AP funktioniert. Der wesentliche Nachteil liegt am Zeitaufwand der Erstellung der Datenbank. Des Weiteren 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 Smartphone-Nutzers passieren (siehe Dornbusch und Zündt 2002).

Mit Hilfe von WLAN-Signalen kann die Positionierung neben der Methode der Trilateration und dem Fingerprinting auch mit dem zellbasierten Verfahren geschehen. Beim einfachen CoO Verfahren wird festgestellt, in welcher Zelle sich der Nutzer befindet (Trevisiani und Vitaletti 2004, Chen 2012). Generell funktioniert CoO bei jedem funkbasierten Netzwerk (GSM, WLAN, etc.). Die Positionierungsgenauigkeit dieser Methode ist abhängig von der Zellgröße, liegt aber im Allgemeinen bei WLAN CoO zwischen mehreren m bzw. 10-er m im Innen- und einigen 100-er 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).

Für die Methode AoA, 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 (siehe z.B. Vossiek und Wiebking 2003).

Abhängig von den Kriterien wie Positionierungstechnik, Infrastrukturkosten oder Zahl der Anwender unterscheidet man zwischen drei Möglichkeiten wo die Positionsbestimmung stattfindet (Drane et al. 1998):

- Serverseitige Positionierung (Network-based Positioning): Hierbei erfassen die Infrastrukturgeräte, wie z.B.

AP oder Bluetooth Beacons, die vom Positionierungsterminal ausgesendeten Daten (MAC-Adresse, Universally Unique Identifier UUID) und ein Server berechnet anschließend die Position.

- Clientseitige Positionierung (Mobile-based Positioning): Bei dieser Art prozessiert das Positionierungsterminal alle ankommenden Signale und berechnet seine eigene Position. Ein Beispiel hierfür sind GNSS-Systeme.
- Hybride Positionierung (Hybrid Positioning): Hierbei werden sowohl Daten der serverseitigen als auch der clientseitigen Positionierung verarbeitet.

3 Modellierung der WLAN-Signalausbreitung

3.1 Grundlagen der WLAN-Signalausbreitung

Die Technologie des Wireless Local Area Network nach der Norm IEEE 802.11 aus dem Jahr 1997 wurde vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) entwickelt und basiert auf dem Standard 802.X, mit dem kabelgebundene LANs beschrieben werden. Im Laufe der Jahre wurde dieser Standard kontinuierlich weiterentwickelt. Es gab Veränderungen in den Übertragungsgeschwindigkeiten sowie in den verwendeten Frequenzbändern. 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 bzw. APs (öffentliche Internetzugangspunkte) bzw. zugänglichem WLAN in Cafés, Bars, Einkaufszentren, etc. führte. Dies bringt jedoch auch eine Vermehrung von Störungen und Fehleranfälligkeiten mit sich. Für den zugrunde liegenden Standard 802.11 stehen für WLAN zwei Frequenzblöcke (bei 2,45 und 5,25 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), (siehe z.B. 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 dem Mobilfunknetz ähnlich. Hierbei werden von einer Basisstation (AP oder drahtlosen Router) Daten an alle Clients gesendet. Ein Netzwerk mit nur einem AP wird als Basic Service Set (BSS) bezeichnet. Die räumliche Abdeckung eines APs wird als Funkzelle beschrieben. Die Größe dieser Funkzelle ist einerseits durch die räumlichen Gegebenheiten, andererseits durch die Sendeleistung bzw. die verwendeten Antennen am AP definiert. Der AP 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 die 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 APs 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).

Elektromagnetische Wellen werden bei WLAN im Infrastruktur-Modus vom AP zu den Clients gesendet. Im Prinzip will man zu einer Positionierung des mobilen Nutzers mittels des Trilaterationsansatzes den Abstand vom Client zum AP mit der empfangenen Signalstärke ableiten. Die Schwingungen elektrischer und magnetischer Ladungen breiten sich im Optimalfall kugelförmig um den Sender (AP) aus. Diese Wellen werden nach ihrer Frequenz bzw. Wellenlänge unterschieden und charakterisieren die Ausbreitungseigenschaften. Die Sendeleistung wird in der Praxis sehr oft in der Einheit dBm (Dezibel-Milliwatt) angegeben. Die Einheit Bel ist eine logarithmische Größe und definiert sich über den Bezug mit einem bestimmten Referenzwert. Im Fall von dBm ist die Referenzgröße 1 mW (Milliwatt). Die maximal abgestrahlte Leistung darf laut Standard IEEE 802.11g einen Wert von 20 dBm Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP), im Frequenzblock von 2,45 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 Sendeleistung kann u. a. auch indirekt durch den User verändert werden, wenn sich ein Roaming ereignet. Die APs ändern auch die Funkleistung durch entsprechende Regelungsmechanismen vom Hersteller, sodass die Signalstärke den gewünschten Anforderungen der Clients entspricht.

Der Antennentyp spielt zusätzlich eine wesentliche Rolle in der Ausbreitung der WLAN-Signale bzw. in der empfangenen Signalstärke am Smartphone. Der Antennengewinn 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. Zum Zweck der Positionierung 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.

3.2 Einflüsse auf die Signalausbreitung

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

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

mit

$$FSPL [dB] = 32,5 + 20 * \log_{10}(f) - 20 * \log_{10}(d), \quad (2)$$

wobei λ die Wellenlänge in [MHz] und d die Distanz zwischen Sender und Empfänger in [km] ist.

Aus der Gl. (1) 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 Gl. (2) 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 im Abschnitt 3.3 näher beschrieben.

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 einen weitaus größeren Störeinfluss verursachen.

Ein maßgeblicher Einfluss auf die Funkwellenausbreitung und damit auf die Signalstärke hat das Fading (dt. Schwund). Damit bezeichnet man durch Interferenz, Abschattungen, Mehrwegausbreitungen und durch Doppler-Effekt verursachte Schwankungen der Empfangsfeldstärke bei Funkübertragungen (siehe z.B. Kammeyer 2008). Fading hat mehrere Ursachen und entsteht durch die Überlagerung verschiedener Phänomene (Short-term Fading, Long-term Fading, etc.). Unter Short-term Fading versteht man rasche Veränderungen des Signals durch mehrere in der Umgebung vorhandene Objekte. Long-term Fading wird oft auch als »Shadowing« bezeichnet und verändert sich über relativ lange Zeiträume aufgrund von weiter entfernt liegenden Objekten. Die Interferenz führt bei einer Überlagerung von Wellen mit gleicher

Frequenz zu einer Verstärkung oder auch Auslöschung. Dies kann einerseits mit anderen technischen Geräten passieren, andererseits auch bei ESS wo mehrere APs, die ungünstigerweise 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 dass 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 Nutzers 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 Nutzer wesentlich beeinträchtigt. Hierbei spielt nicht nur die permanente, unmittelbare Nähe des Nutzers zum Smartphone eine Rolle, ein weit größeres Problem ist die Tatsache, dass die Ausrichtung des Nutzers zum AP sehr veränderlich ist. Dies macht die Dämpfung des Nutzers zu einem sehr schwierig zu modellierenden Effekt und kann nur in einer iterativen Positionierung berücksichtigt werden. Kaemarungsi und Krishnamurthy (2004) beschreiben die Abschwächung des Signals von 9,32 dB bei LOS- bzw. von 5,81 dB bei NLOS-Beobachtungen.

3.3 Einfache 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 AP und Nutzer) 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. Die vorgestellten Ausbreitungsmodelle, welche im Abschnitt 4 mit praktischen RSS Scans evaluiert werden, stellen einen Zusammenhang zwischen den gescannten WLAN-Signalstärken und den Längen zwischen dem mobilen Nutzer und den jeweiligen AP her.

3.3.1 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:

$$P(d) = P_0 + 10\gamma * \log_{10}(d), \quad (3)$$

Tab. 1: Parameter für das One-Slope Modell

	Freq. [GHz]	P_0 [dB]	γ [-]
Bürogebäude	2,45	40,2	4,2
Korridore	2,45	40,2	1,2
Bürogebäude	5,25	46,8	4,6

nach Luntovskyy et al. 2012

wobei P die empfangene Signalstärke RSS, P_0 die Referenzsignalstärke bei 1 m Entfernung, γ der Dämpfungsfaktor und d die Entfernung zwischen Sender und Empfänger ist.

In Tab. 1 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 (siehe Luntovskyy et al. 2012). In den Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit werden diese beiden Koeffizienten P_0 und γ in einem Ausgleichsverfahren mittels praktischer Signalstärkenmessungen mit unterschiedlichsten Smartphones bestimmt.

3.3.2 Multi-Wall-Modell

Dieses semi-empirische Ausbreitungsmodell ist speziell für den Indoor-Bereich entwickelt worden. Semi-empirisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Umgebung in das Berechnungsmodell mit einbezogen 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. schmalen Gängen, Säulen, Stiegenaufgängen, etc.) bzw. 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 betrachtet wird. Je nach Material der Wand wird ein entsprechender Dämpfungswert verwendet. Die Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Multi-Wall-Ausbreitungsmodells, bei welchem drei Wände zum Einsatz kommen. Wie man in der Darstellung erkennen kann, ist jede einzelne Sig-

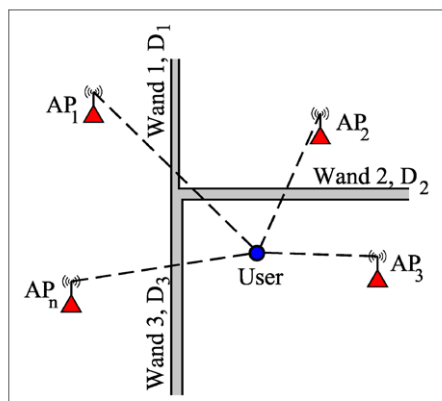


Abb. 1: Schematische Darstellung des Multi-Wall-Modells

nalstärke auf unterschiedlichste Weise betroffen. So können einerseits mehrere Dämpfungswerte an einem Signal auftreten, andererseits sind auch Line-of-Sight (LOS) Beobachtungen möglich. Die Berechnung des Multi-Wall-Modells erweitert sich im Vergleich zum One-Slope-Modell um die Summe aus den einzelnen Signaldämpfungen der Wände in der Form

$$P(d)_{empf} = P_0 + 10\gamma * \log_{10}(d) + \sum_{i=1}^n D_i, \quad (4)$$

wobei P_{empf} die empfangene Signalstärke RSS und D_i der Dämpfungswert der i -ten Wand ist.

Wie im vorherigen Modell werden in einem praktischen Szenario die Koeffizienten P_0 , γ und D_i in einem Ausgleichsverfahren mittels tatsächlich gemessenen Signalstärken 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. Jedoch ist, wie bereits erwähnt, die Ausführungsart (Bewehrung im Beton, etc.) ein maßgebender Faktor, der bei diesem Modell nicht berücksichtigt werden kann. In Tab. 2 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).

Tab 2: Typische Dämpfungswerte bei einer Signalfrequenz von 2,4 GHz

Material	Dämpfung [dB]
dünne Mauer	2 – 5
Ziegelwand	6 – 12
Betonwand	10 – 20
Doppelverglasung	25 – 35
Betondecke	20 – 40

nach Ramlow und Peterhanwahr 2008

3.3.3 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. Im zweiten Fall, dem Ray Tracing (dt. Strahlenverfolgung), werden von einem Empfangs-

punkt rückwärtig alle möglichen Strahlen zum Sender ermittelt, um danach den Energieverlust zu berechnen (Luntovskyy et al. 2012). Beispielsweise ist es möglich, in einem Java basierenden Ray Tracing Simulator von Aveneau et al. (2010) Refraktion und Beugungseffekte von verschiedenen geometrischen Objekten mit unterschiedlichen Eigenschaften zu modellieren. Für präzise Ergebnisse müssen die physikalischen Eigenschaften der Objekte genau bekannt sein 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 sowie die Anwesenheit von Personen, einen nicht zu unterschätzenden Unschärfefaktor dar.

4 Differenzielle Trilateration

Die differenzielle Trilateration nützt permanente Scans von Referenzstationen (RS in Abb. 2), um räumliche und zeitliche Variationen der empfangenen Signalstärken des Nutzers zu eliminieren. Hierbei können auch mehrere Referenzstationen zum Einsatz kommen, welche sich jeweils an koordinativ bekannten Punkten befinden. Das wesentliche Ziel des differenziellen Ansatzes ist es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Nutzerposition zu verbessern. Im Folgenden werden zwei verschiedene Methoden der differenziellen Positionierung vorgestellt.

4.1 Erste Methode der differenziellen Trilateration

Das Prinzip dieser Methode ist ähnlich wie bei DGPS (siehe Abb. 2 links). Die aktuellen Scans der Referenzstation werden mit den nominellen Signalstärken verglichen, die mittels der Position der Referenzstation berechnet werden, um daraus Korrekturen abzuleiten. Der Nutzer 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 Sig-

nalstärke, an der Referenzstation RSS_{theo} ableiten. Durch einfache Differenzenbildung zum Zeitpunkt t zu den gemessenen Werten RSS_{beob} können Korrekturen berechnet werden, die hier als Signalstärkenkorrekturen RSS_{korr} bezeichnet werden:

$$RSS_{korr}(t) = RSS_{theo} - RSS_{beob}(t). \tag{5}$$

Diese Korrekturen werden zu den empfangenen Signalstärken des Nutzers 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.

Durch die Verwendung mehrerer Referenzstationen wird eine räumliche Interpolation der Korrekturen möglich. Hierbei wird eine zweidimensionale lineare Interpolation von Ebenen angewendet, um Korrekturwerte direkt an der Position des Nutzers zu erzeugen (ähnlich den Flächenkorrekturen bei GPS Referenzstationsnetzen). Die allgemeine Ebenengleichung ergibt sich zu

$$z(x, y) = a_0 + a_1 * x + a_2 * y \tag{6}$$

und kann mit den drei Korrekturwerten jeder Referenzstation aufgestellt werden. In Matrixschreibweise:

$$\begin{bmatrix} RSS_{corr1} \\ RSS_{corr2} \\ RSS_{corr3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Die Flächenparameter ergeben sich eindeutig mit

$$a = A^{-1} * z. \tag{8}$$

Mit diesen drei Parametern ist die Ebene exakt definiert. Der Korrekturwert am Nutzerstandort kann direkt mit den Flächenparametern in Gl. (6) bestimmt werden. Sind drei Referenzstationen vorhanden, dann können die Korrekturwerte innerhalb des Dreiecks dieser Stationen interpoliert, wie auch außerhalb des Dreiecks extrapoliert werden.

Wie in Gl. (6) ersichtlich, müssen jedoch die Standpunktkoordinaten des Nutzers vor der Interpolation bekannt sein. Dies geschieht in einem iterativen Prozess, bei welchem die Nutzerposition vorab ohne Korrekturen bestimmt wird.

Die Berechnung der theoretischen Signalstärke an drei Referenzstationen (RS1, RS2 und RS3) erfolgte mit dem One-Slope-Modell (siehe Abschnitt 2.3.1) mit Hilfe der empirisch geschätzten Koeffizienten. Die Abb. 3 zeigt exemplarisch

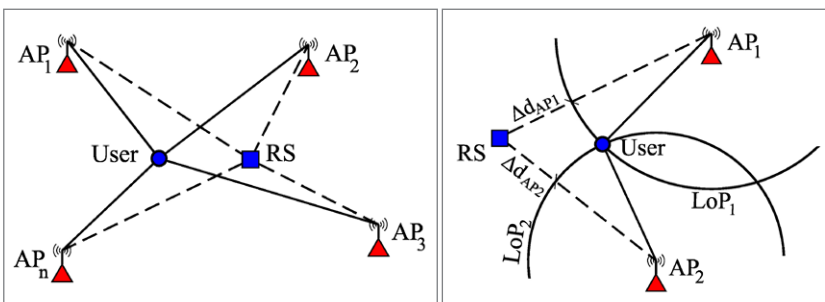


Abb. 2: Konzept der differenziellen Trilateration. Links: erste Methode; rechts: zweite Methode

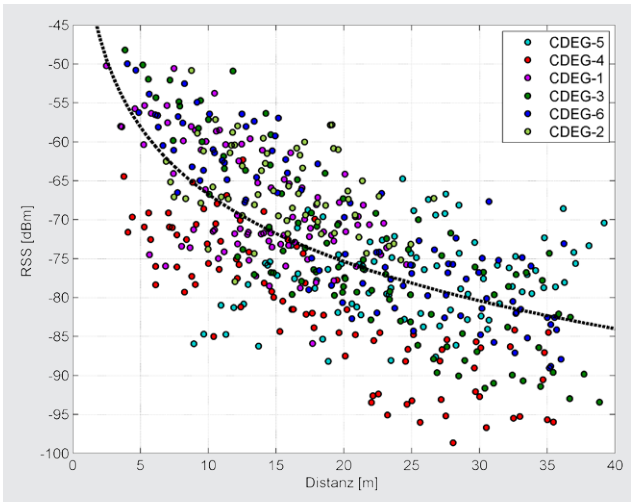


Abb. 3: Längendiagramm der korrigierten Signalstärken eines Smartphones

den Längenzusammenhang mit den verbesserten Signalstärken eines Smartphones. Im Längendiagramm sind die einzelnen Rasterpunkte mit den gemittelten Signalstärkewerten für fünf Scans in vier Orientierungen des Nutzers dargestellt. Signalstärkemessungen zur Kalibrierung werden in der Regel in vier um 90° verdrehten Richtungen, die z.B. parallel zu den Gebäudeachsen orientiert sind, ausgeführt. Diese Vorgehensweise ist eine übliche Praxis, um die Abschirmung der WLAN-Signale durch den Nutzer zu kompensieren. Die farblich gekennzeichneten Punktsymbole charakterisieren die sechs verschiedenen empfangenen Access Points (CDEG-1 bis -6). Es sind beträchtliche Abweichungen zur geschätzten logarithmischen Funktion erkennbar. Des Weiteren können sich bei der Invertierung der RSS zu einer Länge, vor allem bei zu geringen Signalstärken, beträchtliche Distanzabweichungen ergeben. Die Tab. 3 enthält die Koeffizienten der logarithmischen Distanzfunktion sowie die Wurzel des dazugehörigen Determinationskoeffizienten R^2 des Modells im Vergleich zum One-Slope- und Multi-Wall-Modell für ein bestimmtes Smartphone. Grundsätzlich befinden sich die geschätzten Koeffizienten in der Größenordnung zu den theoretischen Werten, die in Tab. 1 zusammengestellt sind. Der multiple Korrelationskoeffizient R ist ein Maß der Bestimmtheit der geschätzten Funktionsparameter. In Tab. 3 ist zu sehen, dass dieser Koeffizient vom Idealwert etwas entfernt liegt, was auf die große Streuung der Signalstärke zurückzuführen ist. Das Smartphone besitzt einen Offset, welcher sich in P_0 widerspiegelt. Im

Tab. 3: Koeffizienten P_0 und γ des One-Slope, Multi-Wall und des One-Slope Modells mit Referenzdaten sowie deren multiple Korrelationskoeffizienten R für ein Smartphone

	P_0 [dB]	γ [-]	R [-]
One-Slope Modell	-50,374	-2,148	0,591
Multi-Wall Modell	-56,839	-1,192	0,829
One-Slope Modell mit Referenzdaten	-38,068	-2,866	0,654

Vergleich zu zwei anderen getesteten Smartphones weist dieser Wert bei gleichem Abstand zu den einzelnen APs eine schwächere Signalstärke beim unkorrigierten One-Slope-Modell auf. Bei den anderen Smartphones wurde ein Wert P_0 von nahezu -40,0 erreicht. Für das One-Slope-Modell mit Referenzdaten liegt der Wert wesentlich näher beim theoretischen Wert. Der Dämpfungsfaktor γ weist einen höheren Betrag auf, was eine stärkere Distanzabhängigkeit in der geschätzten Funktion zur Folge hat. Die Wurzel aus dem Determinationskoeffizienten R^2 zeigt eine geringe Verbesserung zum ersten Fall ohne Referenzstationen. Dies ergab sich auch für die beiden anderen Smartphones. Für das Multi-Wall-Modell ergibt sich ein deutlich höherer Korrelationskoeffizient R . Bei der Referenzsignalstärke P_0 hingegen ist eine Abnahme und im Dämpfungsfaktor γ eine Zunahme feststellbar. Ein Wert für γ nahe Null liefert ein flaches Auslaufen der Funktion, was eine geringere Distanzabhängigkeit zur Folge hat.

4.2 Zweite Methode der differentiellen Trilateration

Das Prinzip der zweiten Methode ist ähnlich wie bei der VLBI (siehe Abb. 2 rechts). Die Differenzenbildung geschieht jedoch nicht auf Basis von Laufzeiten, sondern auf den empfangenen Signalstärken vom Nutzer (User) und der Referenzstation RS nach

$$\Delta RSS = RSS_{user} - RSS_{RS} \tag{9}$$

In Abb. 2 rechts kann man erkennen, dass die Positionsbestimmung des Nutzers grundsätzlich auf derselben Trilaterationsmethode beruht. Jedoch wird der Abstand zwischen Nutzer und Access Point über die bekannte Distanz zwischen Referenzstation und AP und mit der Längendifferenz $d_{user,AP} - d_{RS,AP}$ bestimmt, welche zuvor aus den Signalstärkendifferenzen folgendermaßen abgeleitet wird:

$$d_{user,AP_i} = d_{RS,AP_i} - \Delta d_{AP_i} \tag{10}$$

Das Vorzeichen der Längendifferenz in Gl. (10) muss beachtet werden, da die Signalstärkendifferenz einen inversen Zusammenhang mit der Längendifferenz aufweist. Im Prinzip kann bei dieser Methode der differentiellen Trilateration die Länge zwischen dem AP und dem Nutzer mit einer empfangenen Signalstärke des Nutzers mit beliebig vielen Referenzstationen subtrahiert werden, was weitere Beobachtungsgrößen für die Positionsbestimmung liefert.

Für die Signalstärkendifferenz ΔRSS wird empirisch ein Zusammenhang zur kongruenten Längendifferenz $d_{user,AP} - d_{RS,AP}$ gebildet. Die Abb. 4 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der Signalstärkendifferenz mit den korrespondierenden Längendifferenzen, um aus den subtrahierten Signalstärken einen Längenzusammenhang zu evaluieren. Prinzipiell ist dabei die Signalstärke

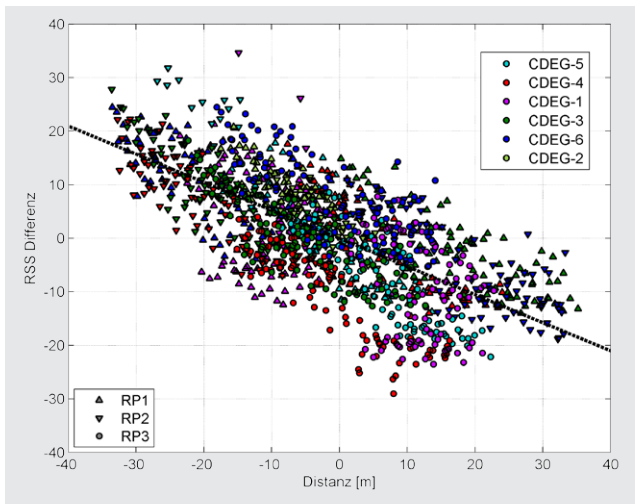


Abb. 4: Längendiagramm der Signalstärkedifferenzen eines Smartphones

des Smartphones mit den drei Referenzstationssignalen einzeln subtrahiert, was eine Verdreifachung der Beobachtungsdaten liefert. Die sechs APs sind wieder mit unterschiedlichen Farben und die drei Referenzstationen mit unterschiedlichen Punktsymbolen gekennzeichnet. Grundsätzlich sind große Variationen der Signalstärkedifferenzen zu den Längendifferenzen zu sehen. Ein inverser, linearer Zusammenhang ist erkennbar und eine Polynomannäherung ersten Grades ist in Abb. 4 als schwarz gestrichelte Linie dargestellt. Bei allen drei verwendeten Smartphones ist die Steigung bzw. der Korrelationskoeffizient mit rund $-0,70$ sehr ähnlich.

Ein Histogramm der Längenabweichungen der ersten differenziellen Methode ist in Abb. 5 links und das der zweiten Methode rechts dargestellt. Bei der ersten 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 zweiten Methode zeigt eine Normalverteilung in den Längenabweichungen, was man auf die lineare Modellfunktion zurückführen kann. Im Grunde genommen könnte man auch das One-Slope- bzw. das Multi-Wall-Modell mit einem linearen Polynom aufstellen, was hier aber nicht weiter verfolgt wird.

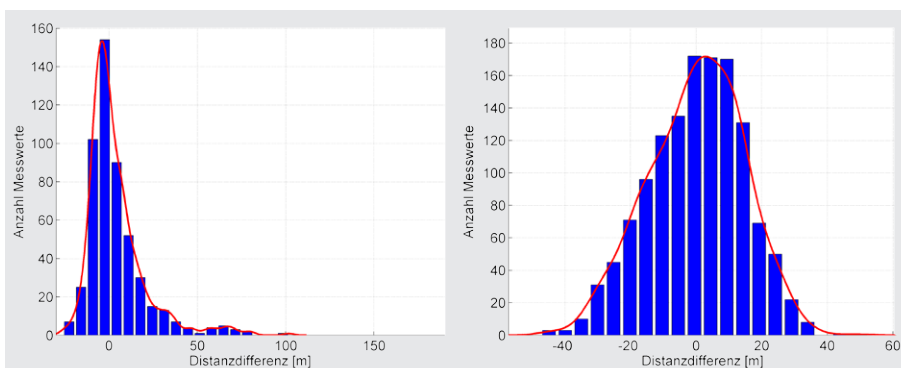


Abb. 5: Histogramme der Distanzabweichungen der ersten (links) und zweiten (rechts) differenziellen Methode

5 Evaluation der durchgeführten Testmessungen

5.1 Messgebiet

Die praktischen Messungen wurden im Foyer sowie einem Hörsaal in einem mehrstöckigen Universitätsgebäude durchgeführt. Es handelt sich generell um einen sehr offenen Gebäudebereich, in welchem der Hörsaal abgegrenzt ist. Die Abb. 6 zeigt einen Grundriss des Testgebiets und Abb. 7 einige Impressionen von der Messumgebung. In einem gesonderten Bereich des Foyers steht eine Reihe von Computern. Die Raumhöhe beträgt im Foyer wie auch im Hörsaal ca. 5 m, wobei im Foyer ein Bereich mit einer Zwischentage vorhanden ist. Diese verschiedenen Bereiche wurden ausgewählt, um verschiedene Bedingungen für die Ausbreitung der WLAN-Signale in Bezug auf deren Dämpfung und Abschirmung widerzuspiegeln. In erster Linie wurden mit drei Smartphones statische Messungen in einer Rasteranordnung durchgeführt. Im Plan sind die 93 Referenzpunkte für die Tests, die in diesem regelmäßigen Raster mit Abständen von 2,52 m (orientiert am Fliesenboden) angelegt wurden, eingezeichnet. Die vier Orientierungen des Nutzers parallel zu den Gebäudeachsen sind auch ersichtlich. Die vorhandene Infrastruktur des WLAN-Netzwerkes ist bei den Signalstärkemessungen genutzt worden. Es befinden sich sechs APs (CDEG-1 bis -6) in guter Aufteilung und in unmittelbarer Umgebung des Messgebietes. Als Referenzstationen wurden drei low-cost Raspberry Pi Einplatinencomputer eingesetzt, welche permanent die Signalstärken der WLAN-Signale scannen. Sie wurden bei den APs CDEG-1, -3 und -6 angebracht bzw. befanden sich auf anderen bekannten Positionen, die das Messgebiet gut umschließen, in einem gleichseitigen Dreieck in einer Höhe von ca. 1 m über dem Fußboden. Dabei befand sich ein Raspberry Pi immer bei AP CDEG-1. Damit konnte auch untersucht werden, ob die Lage der Referenzstationen bei den APs einen Einfluss hat. Das Scanintervall betrug 2 s und es wurde über einen Zeitraum von zwei Tagen aufgezeichnet. Die beiden Standpunkte der Photographien in Abb. 7 sind ebenfalls im Übersichtsplan eingezeichnet. Zusätzlich ist eine blau gekennzeichnete Trajektorie für kinematische Messungen dargestellt. Diese kinematischen Messungen werden jedoch in diesem Beitrag nicht weiter betrachtet.

5.2 Umwandlung der Signalstärken in Distanzen

In einem ersten Schritt wurde die Umwandlung der Signalstärken mit Hilfe der vier Ausbreitungsmodelle untersucht. Dazu wurden die gescannten Signalstärken

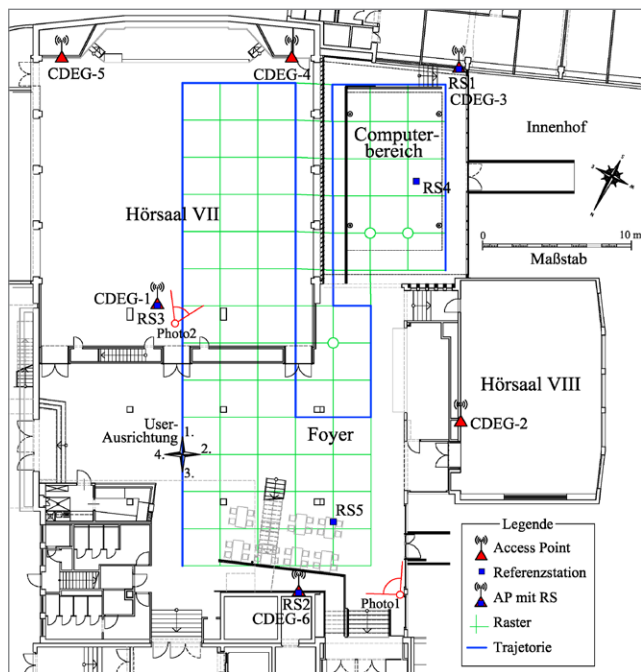


Abb. 6: Plan des Testgebiets

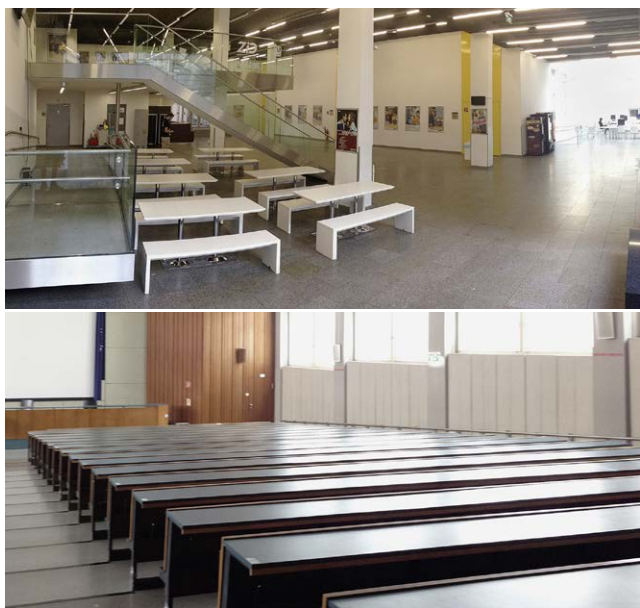


Abb. 7: Impressionen vom Testgebiet: oben das Foyer und unten der Hörsaal VII

in Entfernungsbeobachtungen zwischen Nutzer und AP invertiert, um anschließend die Position des Nutzers in einem vermittelten Ausgleich zu bestimmen. Die Abb. 8 und 9 zeigen die Abweichungen der abgeleiteten Entfernungen zu den aus Koordinaten berechneten Distanzen für die erste und die zweite differenzielle Methode. Zur Invertierung kamen die in Tab. 3 empirisch bestimmten Koeffizienten zur Anwendung. Die Referenzstationen befanden sich direkt unter den APs (CDEG-1, -3 und -6) und wurden in den Darstellungen mit Quadraten symbolisiert. Des Weiteren sind die Abweichungen für die vier verschiedenen Orientierungen des Nutzers von links nach rechts dargestellt. Die Längenabweichungen der verschiedenen APs wurden in der Graphik durch unterschiedliche

Farben gekennzeichnet, wobei zur Übersicht die Vektoren der einzelnen Varianten mit einem Faktor von 0,1 skaliert wurden. Einerseits zeigt der Vektor in Richtung des jeweiligen AP, wenn die berechnete Länge zwischen Nutzer und AP zu kurz ist, andererseits ist der Vektor zur Gegenseite gerichtet. Auf die Abbildungen für das One-Slope- und Multi-Wall-Modell wurde hier verzichtet, da es hier zu wesentlich größeren Abweichungen gekommen ist.

Im Vergleich der einzelnen Detailausschnitte in den Abb. 8 und 9 sind unterschiedliche Längenabweichungen erkennbar. Grundsätzlich kann man bei jeder dargestellten Methode der Signalstärkenumwandlung geringe Unterschiede in den einzelnen Orientierungen des Nutzers feststellen, es sind aber keine systematischen Einflüsse erkennbar. Im unteren Bereich der Rasterpunkte, welcher sich im Foyer des Gebäudes befindet, sind die größten Längenabweichungen bis max. 50,0 m bei allen vier Orientierungen des Nutzers erkennbar. Hier rufen einige Säulen sowie der Stiegenaufgang zur Zwischentage eine wesentliche Dämpfung der WLAN-Signale hervor, weshalb viele umgewandelte Distanzen zu lang berechnet werden. Im oberen Bereich, welcher sich im Hörsaal VII und Computerbereich befindet, sind die Längenabweichungen, mit der Ausnahme des Access Point CDEG-2, wesentlich geringer und die mittleren Abweichungen liegen in einer Größenordnung von 8,6 m.

In der ersten Methode des differenziellen Ansatzes konnte im zentralen Bereich der drei Referenzstationen eine deutliche Verbesserung zum One-Slope-Modell ohne Referenzdaten festgestellt werden. Vor allem die abgeleiteten Entfernungen des APs CDEG-1, an dem sich eine Referenzstation befindet, zeigen gute Ergebnisse in den abgeleiteten Längen durch die Verwendung von Korrekturdaten. Die größte Abweichung liegt in einer Größenordnung von 24,7 m. Diese zeigen sich in der Signalstärke von AP CDEG-3 und CDEG-4 im linken unteren Bereich. Des Weiteren können zu diesen beiden APs im Längendiagramm sehr geringe, korrigierte Signalstärken festgestellt werden, was, wie bereits erwähnt, eine große Abweichung in der Länge durch die flach auslaufende logarithmische Distanzfunktion (vgl. Abb. 3) mit sich bringt. Ebenso ist in Abb. 8 zu erkennen, dass die Längenabweichungen zum äußeren Bereich des Rasters sehr stark zunehmen und in der Mitte der Referenzstationen geringere Abweichungen auftreten.

Die Längenberechnung der zweiten Methode des differenziellen Ansatzes zeigt keine markant großen Abweichungen zu den tatsächlichen Distanzen zwischen Smartphone-Nutzer und AP. Wie im Abschnitt 4.2 beschrieben, wurde die Differenzenbildung der Signalstärken zu den drei Referenzstation durchgeführt, die sich ebenso wie bei der ersten Methode an denselben APs befinden. Die Abb. 9 zeigt an jedem Rasterpunkt die gemittelte Längenabweichung über die Differenzenbildungen der drei Referenzstationen der vier Nutzerorientierungen. Es kann eine räumliche, homogene Verteilung der Längenabweichungen

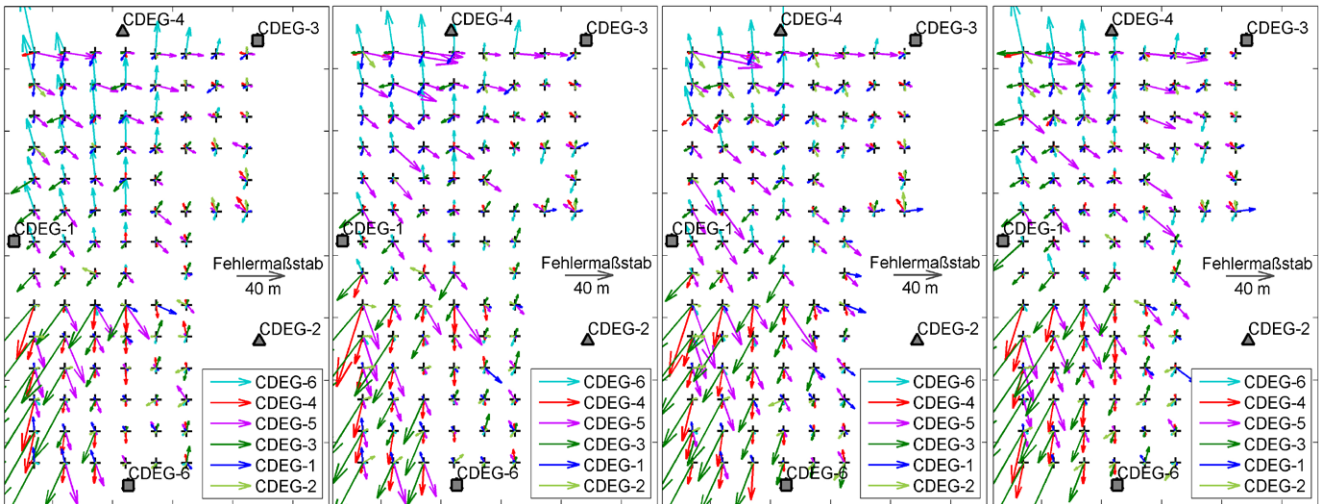


Abb. 8: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen bei der ersten differenziellen Methode (von links nach rechts Orientierungen 1 bis 4 des Nutzers)

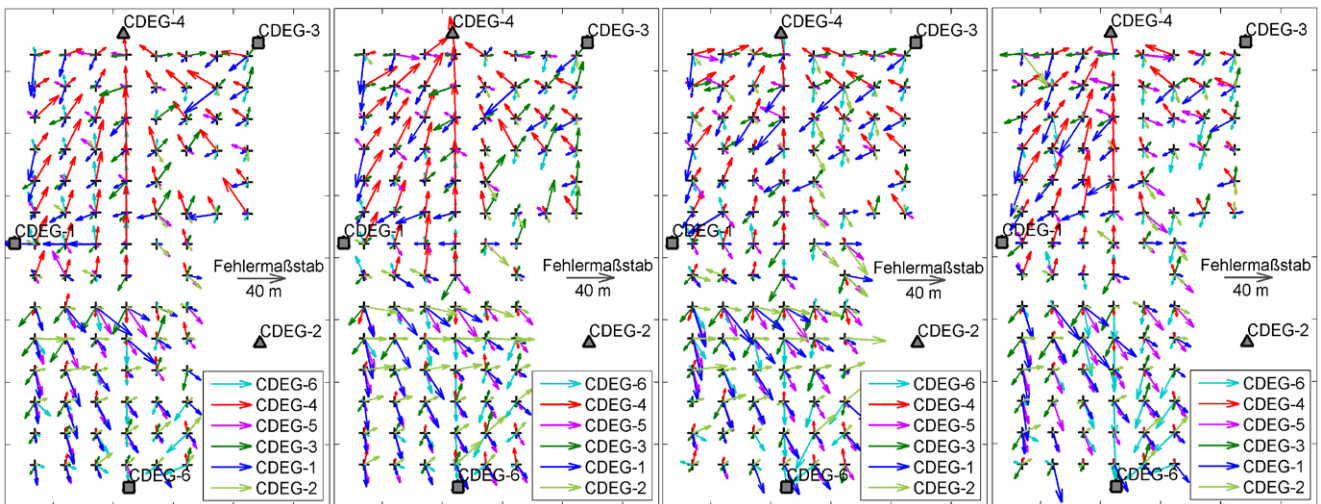


Abb. 9: Abweichungen der abgeleiteten Distanzen bei der zweiten differenziellen Methode (von links nach rechts Orientierungen 1 bis 4 des Nutzers)

chungen beobachtet werden, wobei im linken oberen Bereich (Hörsaal) größere Abweichungen zu erkennen sind. Im Mittel betragen die Längenabweichungen 10,5 m.

5.3 Gewichtung der Beobachtungen für die Ausgleichung

Im nächsten Schritt wird die Nutzerposition aus den abgeleiteten Distanzen in einem vermittelnden Ausgleich bestimmt. Da diese Methode eine Normalverteilung der Beobachtungsdaten voraussetzt und die Histogramme der Längenabweichungen bereits einige markante Abweichungen zeigen (vgl. Abb. 5), 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 wahre Position des Nutzers vorab nicht bekannt ist, somit auch die wahre Distanz zum jeweiligen AP, und andererseits ein mehrfaches Scannen nicht zum

Erfolg führt, 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.

Es ergeben sich bei der Ausgleichung Beobachtungsgleichungen, die nicht linear ist. Daher sind Näherungswerte für die gesuchten Parameter (Nutzerposition) einzuführen. Hierbei werden vorerst die Koordinaten des nächstgelegenen APs als Näherungswerte angenommen. Da sich diese Näherungswerte in manchen Fällen weit entfernt vom Nutzer befinden, ist eine Linearisierung bei der Ausgleichung unzulässig. Darum wird eine Gewichtsiteration nach Schuh (1984) zur iterativen Ausgleichung bei jeder Positionsbestimmung vorgenommen. In jeder Wiederholung werden die Näherungskordinaten mit den zuvor geschätzten Parametern verbessert. Die Iteration wird solange durchgeführt, bis die Norm des geschätzten Parametervektors einen Grenzwert von 1 cm unterschreitet. Bei der vorgenommenen Adaption der dänischen Methode zur Gewichtung der Beobachtungen wird in einem

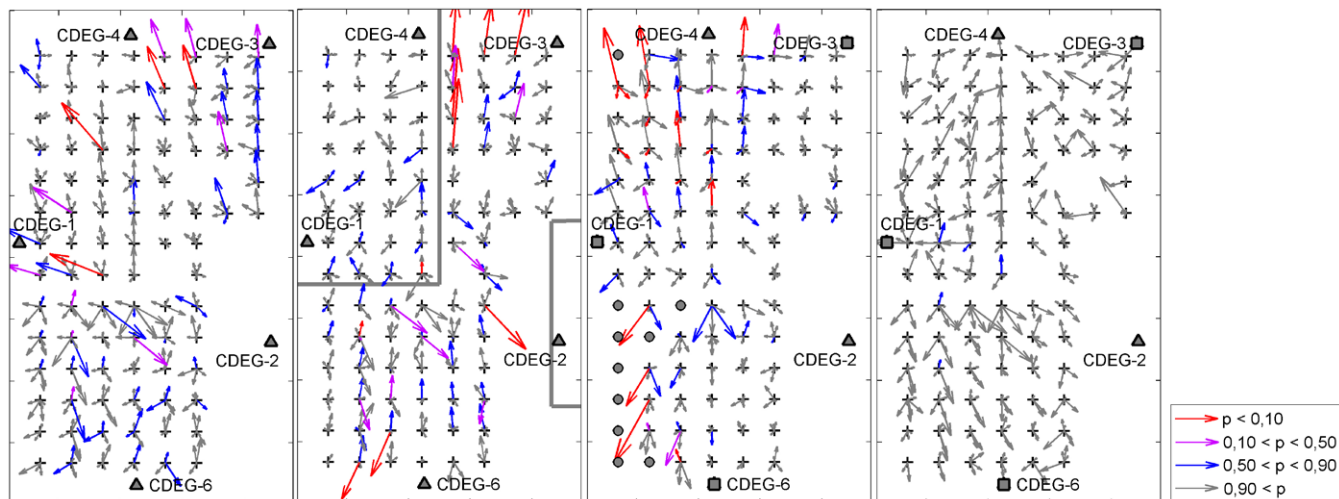


Abb. 10: Gewichte p der Beobachtungen jeweils in der Orientierung 1 des Nutzers (von links nach rechts: One-Slope Modell, Multi-Wall Modell, erste und zweite differenzielle Methode)

iterativen Prozess die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen als Funktion der Verbesserungen des letzten Ausgleichs folgendermaßen ermittelt:

$$p_i = \exp \left| \frac{v_i}{\sigma} \right|^{1,4 \cdot 0,05} \quad \text{für die erste und zweite Iteration und}$$

$$p_i = \exp \left| \frac{v_i}{\sigma} \right|^{3,0 \cdot 0,05} \quad \text{für die weiteren Iterationen} \quad (11)$$

mit den Gewichten p_i , den Verbesserungen v_i und der Gewichtseinheitsvarianz σ .

Die Iteration wird solange wiederholt, bis sich die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen nicht mehr ändert. In der praktischen Anwendung zeigte sich, dass es besser ist, für die Gewichtsfunktion (Gl. (11)) nicht den Gewichtseinheitsfehler, sondern die Standardabweichungen zu verwenden. Da es bereits im Längenzusammenhang einzelne markante Abweichungen gibt (siehe Abb. 3), wurden 5 % der größten Abweichungen vorab eliminiert. Die verwendete Standardabweichung des 95 % Datenbereiches liegt auch deutlich unter dem Gewichtseinheitsfehler. Dies bewirkt eine empfindlichere Gewichtsfunktion, sodass Beobachtungen in einem höheren Maß niedriger gewichtet werden. In Abb. 10 ist die Gewichtung der Beobachtungen jeweils in der Orientierung 1 des Nutzers für alle vier Modelle 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 zweiten Methode des differenziellen Ansatzes zeigen sich keine wesentlichen unterschiedlichen Gewichte, da einerseits die abgeleiteten Distanzen eine Normalverteilung aufweisen (siehe Abb. 5 rechts) und andererseits mehrere Längenbeobachtungen eines Rasterpunktes eine markante Abweichung aufweisen. Aus diesem Grund wird in der zweiten Methode von einer Gewichtung der Beobachtungen abgesehen.

5.4 Schätzung der Positionen des Nutzers

Die Abb. 11 zeigt die Positionsabweichungen der vier Modelle, wobei die dargestellten Isolinien in der Einheit [m] die mittleren Positionsabweichungen der vier Orientierungen kennzeichnen, da die Vektoren der Abweichungen zur Übersichtlichkeit mit einem Faktor von 0,1 skaliert wurden. Die grauen Kreise an Rasterpunkten bedeuten, dass dieser nicht bestimmt werden konnte, wobei die Größe des Kreises die Häufigkeit widerspiegelt. Maximal können alle vier Orientierungen des Nutzers an einem Rasterpunkt nicht bestimmt werden. Im ersten Fall, dem One-Slope-Modell, sind beträchtliche Abweichungen in der Positionsbestimmung im unteren Randbereich erkennbar. Wie bereits bei der Betrachtung der Längenabweichungen beschrieben, treten im Foyer durch Objekte und Bauelemente Dämpfungseffekte auf, die einen signifikanten Einfluss auf die WLAN-Signale und somit auch auf die Positionierung mittels der Trilateration haben. Bei einigen Punkten im Hörsaal können hier gute Ergebnisse mit einer Abweichung von maximal 3 m erzielt werden. Bei Nutzung des Multi-Wall-Modells zeigen sich geringfügige Verbesserungen zum ersten Modell, wobei aber im Foyer fünf Punkte nicht bestimmt werden konnten. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten ist in der statischen Positionierung mit der ersten Methode des differenziellen Ansatzes eine Verbesserung von 7,5 % und bei der zweiten Methode eine Verschlechterung von 9,6 % über den gesamten Bereich erkennbar. In der ersten Methode zeigen sich im zentralen Bereich der drei Referenzstationen gute Ergebnisse. Dies kann durch die Interpolation der Korrekturwerte begründet werden. Jedoch außerhalb des Dreiecks der drei Referenzstationen steigen die Positionsabweichungen mit zunehmendem Abstand an, was durch die stattfindende Extrapolation der Korrekturwerte hervorgerufen wird. Bei der zweiten Methode des differenziellen Ansatzes ergeben sich im oberen rechten Computerbereich ähnlich gute Ergebnisse wie bei der ersten Methode, wobei aber in den restlichen Berei-

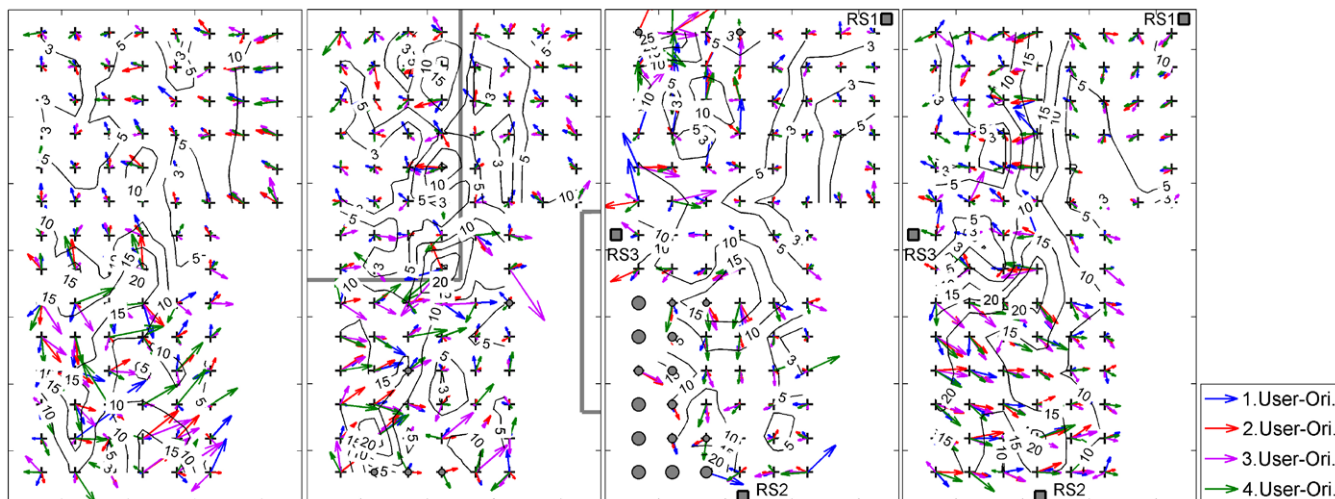


Abb. 11: Positionsabweichungen des One-Slope Modells, Multi-Wall Modells, erster und zweiten differenziellen Methode (von links nach rechts; Isolinen in [m])

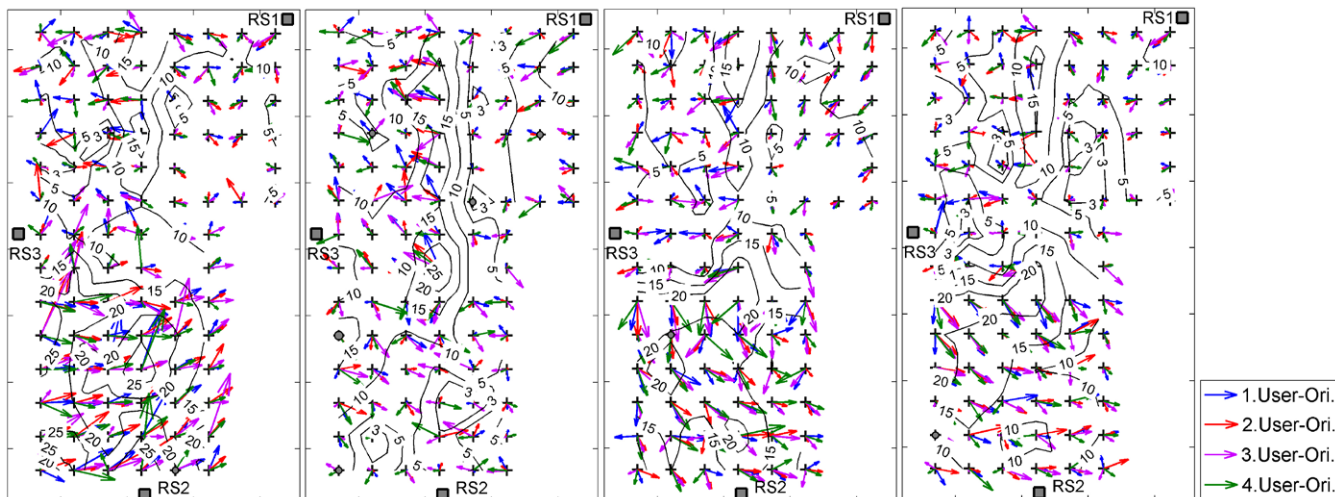


Abb. 12: Positionsabweichungen der zweiten differenziellen Methode (von links nach rechts: Differenzbildungen mit Referenzstation RS1, RS2, RS3 und mit einer inversen Gewichtung der Distanzen; Isolinen in [m])

chen die Positionsabweichungen im Gegensatz zum One-Slope-Modell ohne Referenzstationen angestiegen sind. Da bei der zweiten Methode eine einfache Mittelbildung über die drei Referenzstationen durchgeführt wurde, sind weitere Ergebnisse in Abb. 12 dargestellt. Die Abbildung zeigt unterschiedliche Varianten der Differenzbildung. Von links nach rechts sind die Differenzbildungen mit Referenzstation RS1, RS2, RS3 und mit einer inversen Gewichtung der Distanzen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Positionsbestimmung in der Nähe der jeweiligen Referenzstation gute Ergebnisse liefert. Zur inversen Gewichtung zum Abstand der jeweiligen Referenzstation wurden die bekannten Rasterkoordinaten verwendet. Hierbei sind die Positionsabweichungen gegenüber einer einfachen Mittelbildung um 2,3 % gesunken.

Die Abb. 13 zeigt vier Darstellungen der Streuung der Positionsabweichungen mit ihren 95 % Konfidenz-ellipsen für die vier Modelle unterteilt in die verschiedenen Bereiche des Messgebiets. Bei der räumlichen Unterteilung ist klar ersichtlich, dass im Computerbereich bei allen Methoden die besten Ergebnisse erzielt wurden. Bei

der statischen Positionierung ohne Referenzstationen liegen die mittleren Positionsabweichungen bei rund 11,0 m und bei guten räumlichen Bedingungen reduzieren sich diese auf 8,0 bis 9,0 m. Das One-Slope-Modell zeigt im Foyer einen markanten Anstieg der Positionsabweichungen, da, wie bereits erwähnt, verschiedene Einflussfaktoren die WLAN-Signale signifikant beeinflussen. Die erste Methode des differenziellen Ansatzes liefert im Foyer die geringsten Abweichungen. Das Multi-Wall Modell zeigt im Vergleich zum One-Slope-Modell, eine geringe Verbesserung, mit der Ausnahme im Hörsaal. Hier haben sich die mittleren Positionsabweichungen um 1,2 m vergrößert, konnten aber im Foyer um 2,3 m gesenkt werden. Durch die Hinzunahme der Referenzstationsdaten können in der ersten Methode der differenziellen Trilateration die mittleren Positionsabweichungen um 0,8 m und der Helmertsche Punktlagefehler um 0,7 m verbessert werden. Die zweite 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

Abb. 11 und 13 ist ebenfalls erkennbar, dass in den beiden differenziellen Methoden im Computerbereich die besten Positionierungsergebnisse erzielt wurden.

5.5 Vergleich der Ergebnisse dreier Smartphones

Abschließend ist in Abb. 14 ein Vergleich der maximalen Positionierungsabweichungen von den in der Studie verwendeten drei Smartphones, die durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet sind, dargestellt. Der gesamte Messbereich wurde wieder in drei Bereiche (das Foyer, den Hörsaal und den Computerbereich) unterteilt. Hier sind markante Unterschiede erkennbar, wobei im Foyer mit allen verwendeten Smartphones und Berechnungsmethoden die deutlich schlechtesten Ergebnisse erzielt wurden. Der Grund dafür sind die schon vorher angesprochenen Auswirkungen der signifikanten Dämpfung der WLAN-Signale in diesem Bereich. Dieser Effekt wirkt sich sehr negativ auf die Positionierung mittels Trilateration aus. Aus der direkten Gegenüberstellung mittels der Balkendiagramme im Vergleich der drei Smartphones kann gesehen werden, dass das erste Smartphone (in den Rottönen dargestellt) 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 m mit der ersten Methode und auf 14,4 m mit der zweiten Methode des differenziellen Ansatzes gesenkt werden. Es ist auch bei allen drei Smartphones erkennbar, dass die erste gegenüber der zweiten Methode deutlich bessere Ergebnisse für die statische Positionierung liefert. Hier muss aber gesagt werden, dass einige Positionen des Nutzers nicht bestimmt werden konnten (vgl. Abb. 11).

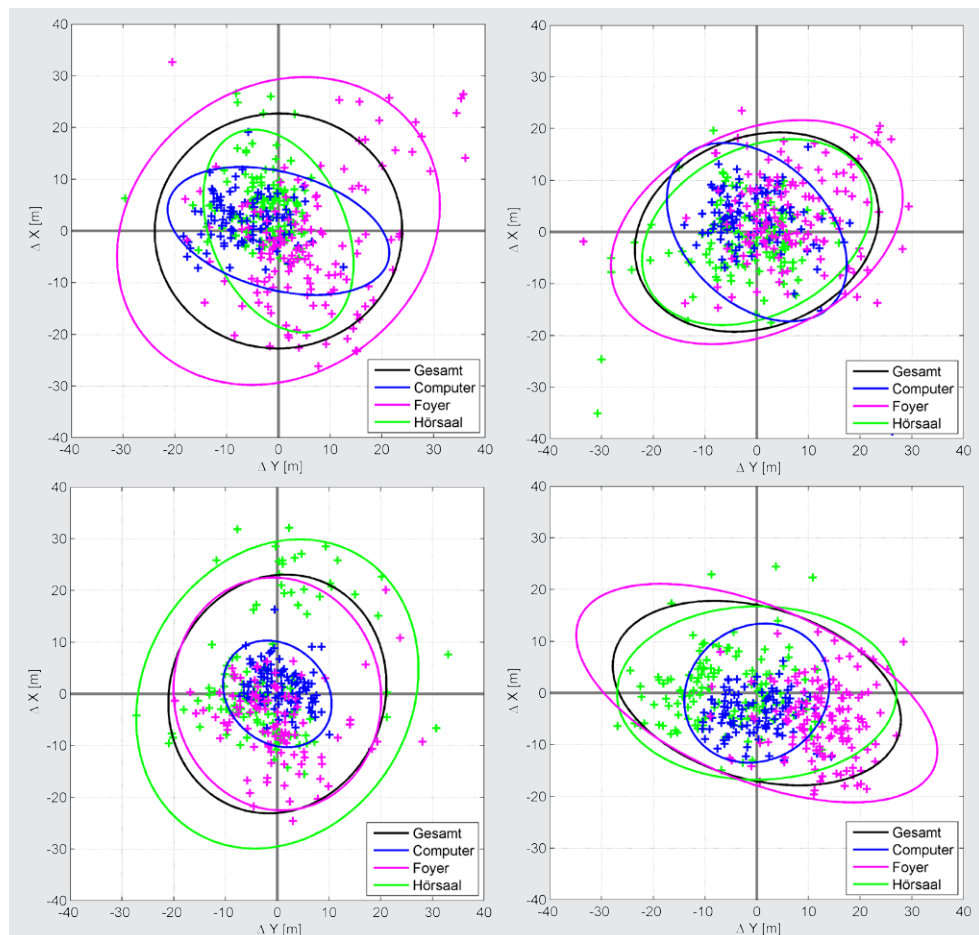


Abb. 13: Positionsabweichungen mit 95 % Konfidenzellipsen (One-Slope Modell links oben, Multi-Wall Modell rechts oben, erste und zweite differenzielle Methode links und rechts unten)

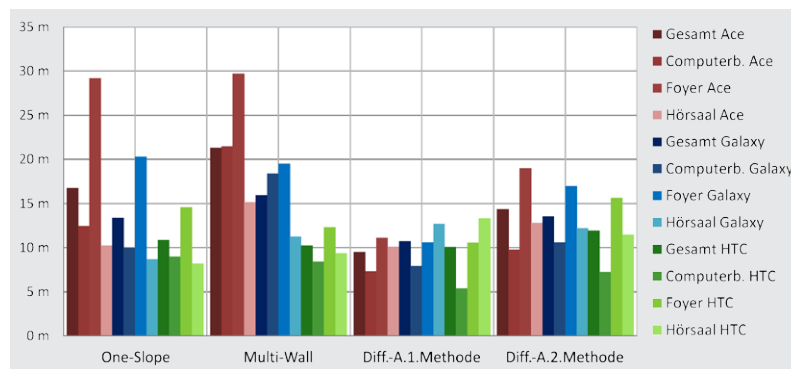


Abb. 14: Maximale Positionsabweichungen in den unterschiedlichen Bereichen des Messgebiets für drei verschiedene Smartphones

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Studie war es, ein Indoor-Positionierungssystem unter Verwendung von WLAN-Signalstärken auf Basis der Trilateration zu entwickeln. Dabei werden erstmalig die aufgezeichneten WLAN-Signale der Smartphones durch permanente Scans an Referenzstationen verbessert. In den praktischen Anwendungen, welche in einem Foyer und Hörsaal eines Universitätsgebäudes gemacht wurden, kamen Raspberry Pis als Referenzstationen zum Einsatz. Insgesamt wurden statische und kinematische Signalstärkenscans mit drei unterschiedlichen Smartphones durchgeführt.

Langzeitbeobachtungen der WLAN-Signalstärken an den Referenzstationen zeigten große zeitliche Variationen und Signalrauschen, was grundsätzlich in der Positionsbestimmung mit Signalstärken eine große Herausforderung darstellt. In Summe wurden vier Methoden der Konvertierung der WLAN-Signalstärken in Distanzen zu den Access Points APs untersucht. In der ersten Methode, 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 Entfernung zwischen Nutzer und APs zu erhalten.

Bei der Positionsbestimmung hat sich gezeigt, dass eine einfache vermittelnde Ausgleichung problematisch ist, da diese nicht robust ist. Aus diesem Grund wurde zur Elimination der markanten Längenabweichungen eine Adaption der dänischen Methode zur Gewichtsiteration verwendet, bei welcher große Verbesserungen in einem iterativen Prozess niedrig gewichtet werden. Mit der ersten Methode des differenziellen Ansatzes konnten im zentralen Bereich der Referenzstationen gute Ergebnisse bei der Positionierung erhalten werden. Die durchschnittlichen Abweichungen liegen in einer Größenordnung von 3 m. Die Positionsabweichungen bei der zweiten Methode beliefen sich auf rund 5 m. Es zeigen sich aber markante Unterschiede in den Bereichen des Messgebiets bei allen vier Methoden, da durch Dämpfungseffekte gravierende Einflüsse auf die Signalstärke und somit auch auf die Positionierung mittels der Trilateration ausgeübt werden.

Durch die Analyse der Auswahl des Standortes der drei Referenzstation konnte gezeigt werden, dass bei der ersten Methode des differenziellen Ansatzes ein deutlicher Zusammenhang zwischen Positionsabweichungen und dem Abstand zwischen Nutzer und Referenzstation besteht. Die Positionsabweichung wächst mit zunehmendem Abstand zur Referenzstation, wobei dieser Trend in der zweiten Methode deutlich schwächer ausgeprägt ist. Durch eine höhere Anzahl an Referenzstationen und der Verkürzung des Abstandes zwischen diesen, wäre eine Steigerung der Positionsgenauigkeit erreichbar. Eine weitere Strategie ist die Vernetzung der Referenzstationen und die Ableitung und Anbringung von Flächenkorrekturparametern FKP. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass die Signalstärkeverteilungen in dynamischen Signalstärkekarten (sog. Radio Maps) zeitabhängig betrachtet und in Echtzeit abgeleitet und angewendet werden können. In weiterer Folge ist auch der Einsatz des Konzepts der virtuellen Referenzstationen denkbar. Dies wird auch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass der entscheidende Vorteil der Anwendung von Referenzstationen im Vergleich zum

üblichen WLAN Fingerprinting Verfahren demnach darin besteht, dass keine aufwendige Trainingsphase notwendig ist, sondern die zeitlichen Variationen der Signalstärken und diverse Ausbreitungseffekte durch die kontinuierlichen Messungen an den Referenzstationen in Echtzeit bestimmt werden und die somit ermittelten Korrekturen beim Nutzer angebracht werden können.

Als abschließendes Resümee kann festgehalten werden, dass in großen, freien Räumen auch das One-Slope-Modell ohne Referenzstationen durchaus gute Ergebnisse in der statischen Positionierung liefert. Bei auftretender Dämpfung der Signale durch Objekte zeigte die Verwendung von Referenzstationsdaten eine wesentliche Verbesserung in der Positionierung des Smartphone-Nutzers. Mit den Untersuchungen konnte somit bestätigt werden, dass der Ansatz der differenziellen Trilateration vielversprechend und die eingeschlagene Richtung zielführend ist.

Literatur

- Avenau, L., Masson, E., Combeau, P. (2010): RaPSor: a Radio Propagation Simulator, Presentation and Use Cases. Produktpräsentation. www.researchgate.net/publication/228735225_RaPSor_a_Radio_Propagation_Simulator_Presentation_and_Use_Cases.
- Chen, R. (2012): Introduction to Smart Phone Positioning. In: Chen, R. (Ed.), Ubiquitous Positioning and Mobile Location-based Services in Smart Phones. Hershey: IGI Global, S. 1–31.
- Dornbusch, P., Zündt, M. (2002): Realisierung von Positionsortung in WLAN. ITG-Fachtagung Technologie und Anwendung für die mobile Informationsgesellschaft.
- Drane, C., Macnaughtan, M., Scott, C. (1998): Positioning GSM Telephones. IEEE Communication Magazine, 36 (4), S. 46–54.
- Honkavirta, V. (2008): Location Fingerprinting Methods in Wireless local Area Networks. Master of Science Thesis, Tampere, Tampere University of Technology.
- Kjergaard, M.B. (2007): A Taxonomy of Location Fingerprinting. In: Hightower, J., Schiele, B., Strang, T. (Eds.): LoCA 2007, LNCS 4718, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 139–156.
- Kaemarungsi, K., Krishnamurthy, P. (2004): Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting. Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services MOBILQUOUS 2004, S. 14–23.
- Kammeyer, K.-D. (2008): Nachrichtenübertragung. 4. Auflage, Vieweg und Teubner.
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., Liu, J. (2007): Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part C: Applications and Reviews, 37(6), S. 1067–1080.
- Luntovskyy, A., Gütter, D., Melnyk, I. (2012): Planung und Optimierung von Rechnernetzen. Springer Science and Business Media.
- Mautz, R. (2012): Indoor Positioning Technologies. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische Geodätische Kommission, 86. Band, 134 S.
- Metter, M., 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.
- Mok, E., Retscher, G. (2007): Location Determination Using WiFi Fingerprinting Versus WiFi Trilateration. Journal of Location Based Service, 1(2), S. 145–159.
- Ramlow, S., Peterhanwahr, J. (2008): Industrial Wireless. Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH & Co KG, 1. Auflage, Konstanz.
- Retscher, G. (2007): Augmentation of Indoor Positioning Systems with a Barometric Pressure Sensor for Direct Altitude Determination in a Multi-storey Building. Journal of Cartography and Geographic Information Science CaGIS, 34(4), S. 305–310.

- Retscher, G. (2016): Indoor Navigation. Chapter 9-1. In: E. W. Grafarend (Ed.), Encyclopedia of Geodesy. Earth Sciences Series, Springer International Publishing Switzerland, 7 S.
- Schuh, W.-D. (1984): Rasche und einfache automatische Fehlererkennung bei großen Datenmengen. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, vol. 72, no. 4, S. 137–147.
- Shchekotov, M. (2008): Indoor Localization Method Based on Wi-Fi Trilateration Technique. 16th Conference of Geodesy Association, S. 177–179.
- Stojanović, D., Stojanović, N. (2014): Indoor Localization and Tracking: Methods, Technologies and Research Challenges. Facta Universitatis Series: Automatic Control and Robotics, 13(1), S. 57–72.
- Trevisiani, E., Vitaletti, A. (2004): Cell-ID Location Technique, Limits and Benefits: an Experimental Study. 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications WMCSA 2004, S. 51–60.
- Vossiek, M., Wiebking, L. (2003): Wireless Local Positioning – Concepts, Solutions, Applications. IEEE Radio and Wireless Conference RAWCON'03, S. 219–224.
- Yang, J., Chen, Y. (2009): Indoor Localization Using Improved RSS-Based Trilateration Methods. IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2009.

Anschrift der Autoren

Prof. Günther Retscher
TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation
Engineering Geodesy Group
Gusshausstraße 27–29, 1040 Wien, Österreich
guenther.retscher@geo.tuwien.ac.at

Thomas Tatschl
Kostmann Ges.m.b.H.
St. Andrä, Österreich
thomas.tatschl@gmail.com

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.